SCIENCES ET AVENIR

sciencesetavenir.fr

© L.GILLIERON/KEYSTONE/SIPA
SCIENCE PHOTO LIBRARY/SHUTTERSTOCK

Molière
DÉCRYPTÉ PAR L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE
p.56

MAL de DOS

Les méthodes qui marchent

p.30

FÉVRIER 2020 - N° 876 ALLEMAGNE 6.80 € / AUTRICHE 5.80 € / BELGIQUE 5.20 € / GRÈCE 5.20 € / ITALIE 5.20 € / DOM 5.20 € / ANDORRE 4,90 € / / LUXEMBOURG 5.20 € / PORTUGAL 5.20 € / TOM 730 XPF / TOM (AVION) 1400 XPF / SUISSE 8.80 CHF / TUNISIE 7.90 TND / MAROC 50 DH / CANADA-USA 7.50 $

M 02667 - 876 - F: 4,80 € - RD

SCIENCES ET AVENIR - N° 876 - FÉVRIER 2020 - MAL DE DOS

Big Data
IA
Digital
Santé
Automobile
Aéronautique
Cybersécurité
Agriculture...

Spécial

INGÉNIEUR

Les meilleures filières pour trouver un emploi p.85

NOUVEAU SUV PEUGEOT 2008

UNBORING THE FUTURE*

BETC Automobiles PEUGEOT 552 144 503 RCS Nanterre.

À PARTIR DE

179 €/MOIS(1)

APRÈS UN 1ER LOYER DE 2990 €
ENTRETIEN OFFERT

THERMIQUE

NOUVEAU PEUGEOT i-Cockpit® 3D(2)

CONDUITE SEMI-AUTONOME(3)

LE CHOIX DE L'ÉNERGIE : ÉLECTRIQUE, ESSENCE, DIESEL

MOTION & e-MOTION

PEUGEOT RECOMMANDE TOTAL Consommation mixte NEDC** (l/100 km) : de 3,6 à 5,0 ; Émissions de CO_2 NEDC** (g/km) : de 97 à 114.

*Pour un futur qui ne soit pas ennuyeux. **Les valeurs de consommation de carburant et d'émissions de CO_2 sont déterminées sur la base d'une nouvelle réglementation WLTP (Règlement UE 2017/948) et les valeurs obtenues ont été converties en NEDC pour permettre la comparabilité avec les autres véhicules. Veillez à vous rapprocher de votre point de vente pour de plus amples informations. Les valeurs ne tiennent pas compte notamment des conditions d'usage, du style de conduite, des équipements ou des options et peuvent varier en fonction du type de pneumatiques. Pour de plus amples renseignements sur les consommations de carburant et les émissions de CO_2, veuillez consulter le guide pratique intitulé « Consommations conventionnelles de carburant et émissions de CO_2 des véhicules particuliers neufs » disponible gratuitement dans tous les points de vente ou auprès de l'ADEME - Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (Éditions, 2 square Lafayette BP 406 F – 49004 Angers Cedex 01) ou sur http://www.carlabelling.ademe.fr/. En location longue durée sur 49 mois et pour 40000 km. (1) Exemple pour la location longue durée (LLD) d'un nouveau SUV PEUGEOT 2008 Active PureTech 100 BVM6 neuf, hors options, incluant l'entretien et l'assistance offerts pendant 49 mois. **Modèles présentés :** nouveau SUV PEUGEOT 2008 GT PureTech 155 S&S EAT8, options peinture métallisée

Orange Fusion et toit ouvrant : **301 €/mois** après un 1er loyer de 4800€ et nouveau SUV PEUGEOT e-2008 GT, option peinture métallisée Bleu Vertigo : **279€/mois** après un 1er loyer de 4790€, déduction faite du bonus écologique et de la prime à la conversion(4). Montants exprimés TTC et hors autres prestations facultatives. (4) Après déduction d'un bonus écologique d'un montant maximum de 6000€ et de la prime à la conversion gouvernementale de 2500€ sous condition de reprise d'un véhicule diesel immatriculé avant le 01/01/2006 ou d'un véhicule essence immatriculé avant le 01/01/1997 selon décret en vigueur qui s'applique. Offre valable du 02/01/2020 au 29/02/2020, réservée aux personnes physiques pour un usage privé pour toute LLD d'un nouveau SUV PEUGEOT 2008 neuf dans le réseau PEUGEOT participant, sous réserve d'acceptation du dossier par CREDIPAR, loueur et SA au capital de 138517008€, RCS Nanterre n° 317 425 981, ORIAS 07004921 (www.orias.fr), 9 rue Henri Barbusse, 92230 Gennevilliers. Offre non valable pour les véhicules au prix PEUGEOT Webstore et les véhicules sur le site store.peugeot.fr. La LLD peut être souscrite seule sans CPS Pack Entretien et ce dernier peut être souscrit indépendamment de toute LLD aux conditions disponibles dans le réseau PEUGEOT participant. (2) De série ou indisponible selon les versions. (3) De série, en option ou indisponible selon les versions.

Photos de gauche à droite :

Marianne Duruel
Guide naturaliste

Christian Genillard
Guide et chef d'expédition

Manchots, Boulders Beach

Lion, parc Kruger

Renvoyez ce coupon à Croisières d'exception - 77 rue de Charonne - 75011 Paris

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : ⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌋ Ville : .....

Tél. : ⌊_⌊_ ⌊_⌊_ ⌊_⌊_ ⌊_⌊_ ⌊_⌋ E-mail : .....

Conformément à la loi "Informatique et Liberté" du 6 janvier 1978, nous vous informons que les renseignements ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande et que vous disposez d'un droit d'accès, de modification et de rectification des données vous concernant. * Se référer à la brochure pour le détail des prestations et les conditions générales de vente. Licence n° IM075150063. Les conférenciers seront présents sauf en cas de force majeure. Création : nuitdepleinelune.fr - Photos : © iStock, © Croisières d'exception et © Oceania.

sciencesetavenir-200130-2101-afsud

CROISIÈRE

Envoûtante Afrique du Sud

Au cœur de la nature sauvage

Du 17 janvier au 3 février 2021

Monts des Douze Apôtres, Le Cap - Afrique du Sud

En janvier 2021, laissez-vous porter par la magie de notre croisière **Afrique du Sud** qui vous emmènera aussi en **Namibie** et au **Mozambique**. Un voyage inoubliable et envoûtant : **safari** au royaume des grands fauves, paysages époustouflants - des falaises rocheuses du **cap de Bonne-Espérance** aux plages indomptées de la côte sauvage -, majesté et éclectisme de la ville du **Cap**, traditions de peuples ancestraux… Vous serez notamment accompagné de **Marianne Duruel** et de **Christian Genillard**, guides naturalistes passionnés, qui vous dévoileront les secrets d'un pays dont la **biodiversité** est l'une des plus importantes de la planète.

Possibilité de prolonger votre séjour de 5 jours au Parc Kruger et à Johannesbourg.

À bord de l'*Oceania Nautica* (342 cabines)

OFFRE SPÉCIALE - **500 €/pers.** pour toute réservation avant le 29 février 2020 (code REVE)

Demandez la brochure au **01 75 77 87 48**, par e-mail à **contact@croisieres-exception.fr**, sur **www.croisieres-exception.fr/brochures** (code **SCAFS** à renseigner) ou chez votre agence de voyages habituelle.

Croisières d'exception

S'enrichir de la beauté du monde

PRODUISONS DE L'ÉLECTRICITÉ SANS DÉRANGER LE GYPAÈTE BARBU.

EDF s'engage à préserver la biodiversité et modifie les activités de maintenance de plusieurs centrales hydrauliques durant la période de reproduction du gypaète barbu, un rapace menacé d'extinction. D'ici à 2021, la Recherche et Développement du groupe EDF va consacrer 21 millions d'euros* à la réduction des impacts sur les écosystèmes.

Devenons l'énergie qui change tout.

Rejoignez-nous sur edf.fr

L'énergie est notre avenir, économisons-la !

*Document de référence 2018 d'EDF, page 178 – « Innover pour la biodiversité »

RCS PARIS 552 081 317

ÉDITO

BERNARD MARTINEZ

Dominique Leglu
Directrice de la rédaction

Les nouvelles années folles

Avec 2020, sans même répondre à la question de savoir si l'année doit être vue comme la dernière de la décennie actuelle ou la première d'une nouvelle décennie (1), la tentation est forte de se sentir à un tournant. Ou tout du moins de s'interroger sur ce qu'on pourrait appeler les « nouvelles années vingt ». Seront-elles les années folles du XXIe siècle ? Folie joyeuse ou plutôt triste ? Les pages « Événement et Prospective » de ce mois-ci *(pp. 12-15)* oscillent, de fait, entre Jean qui pleure et Jean qui rit. On l'aura deviné, c'est la fin de l'année 2020 et ce que certains appellent déjà « *la COP de la dernière chance* » qui donne de quoi grimacer (2). Après l'échec cuisant (sans jeu de mots) de Madrid en décembre dernier, se tiendra à Glasgow la 26e conférence des Nations unies sur le changement climatique. C'est peu de dire que ledit changement fait de plus en plus suffoquer et pas seulement Greta Thunberg. Ces dernières semaines ont vu brûler des millions d'hectares en Australie, malade de la sécheresse, mourir près de 30 personnes et plus d'un milliard d'animaux. Or ici, en France, de hauts responsables incendie (ONF, Inrae, SDIS des Bouches-du-Rhône) poussent un cri d'alarme : oui, de tels mégafeux sont possibles sur notre territoire *(p. 60)*, et la hausse prévisible des températures ne manquera pas de les attiser. À Glasgow, donc, les États devront enfin s'engager pour préciser les réductions d'émissions gaz à effet de serre, à la source de bouleversements sur la planète. Dernière chance ? Après avoir constaté tous *« les obstacles aux politiques du changement climatique »* (prisonniers du nationalisme, du présent, de l'esprit partisan, de l'intérêt économique personnel, etc.), William Nordhaus, professeur à l'université Yale (États-Unis) et prix Nobel d'économie 2018, conclut ainsi son livre *Le Casino climatique* : *« Les êtres humains mettent la planète en péril. Mais les êtres humains sont capables de défaire ce qu'ils font. Ils peuvent y parvenir à relativement faible coût [...] s'ils mettent en place un mécanisme économique qui pénalise les émissions carbonées et consacrent de vigoureux efforts à la mise au point de technologies peu voraces en carbone. »* (3) Est-il alors permis d'être optimiste ? De vigoureux efforts, les humains semblent capables d'en redoubler. Tout particulièrement quand il s'agit de découverte. En cette année 2020, la pointe avancée de cette insatiable curiosité d'*Homo sapiens* a pour nom un objet céleste bien connu : l'indétrônable Mars ! Planétologues et astrophysiciens ne s'en lassent pas plus que le cinéma hollywoodien. Quatre missions doivent partir cet été vers la planète Rouge *(p. 14)*. Montées par l'Europe et la Russie, la Chine, les États-Unis, les Émirats arabes unis. Faut-il une autre planète pour que l'ardeur soit là, avec volonté de coopération ? ■

@dominiqueleglu

(1) sciav.fr/876decennie.
(2) COP signifie « Conférence des parties ».
(3) *Le Casino climatique. Risques, incertitudes et solutions économiques face à un monde en réchauffement*, William Nordhaus, De Boeck Supérieur, 2019.

SCIENCES ET AVENIR

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris - Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr - Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice de la rédaction
Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
assistée de Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01

Rédacteur(trices) en chef
Carole CHATELAIN (mensuel) - 01.55.35.56.57
Vincent REA (hors-série) - 01.55.35.56.35
avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Olivier LASCAR (pôle digital) - 01.55.35.56.15

Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10

Rédactrices en chef adjointes
Andreina DE BEI (photo-iconographie) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (pôle digital) - 01.55.35.56.39

Direction artistique
Thierry VERRET (conception)
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT (directeur artistique) - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (directrice artistique adjointe) - 01.55.35.56.21

Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18

Chef(fe)s de service
Azar KHALATBARI (fondamental, sciences de la Terre) - 01.55.35.56.46
Rachel MULOT (enquêtes) - 01.55.35.56.07
Mathieu NOWAK (actualités, rendez-vous) - 01.55.35.56.38

Adjoint au chef de service
Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45

Cheffe de rubrique
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54

Rédaction
Bernadette ARNAUD grande reporteure (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.44
Franck DANINOS (fondamental) -
Arnaud DEVILLARD (numérique, data) - 01.55.35.56.27 - Olivier HERTEL (technologie, futur) - 01.55.35.56.03
Hugo JALINIÈRE (médecine, biologie) - 01.55.35.56.52 - Sylvie ROUAT (espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Elena SENDER grande reporteure (biologie, neurosciences) - 01.55.35.56.43

Collaborateurs(trices)
Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN

Ont participé à ce numéro
Marine BENOIT, Cécile COUMEAU, Héloïse CHAPUIS, Pierre KALDY, Sylvie LECHERBONNIER, Coralie LEMKE, Muriel de VÉRICOURT

Secrétaire de rédaction
Frank MIETTON (1er secrétaire) - 01.55.35.56.17

Maquette Horia BAHRI - 01.55.35.56.19

Photo-iconographie
Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32

Pôle digital
Joël IGNASSE (rédacteur spécialisé) - 01.55.35.56.15
Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Camille GAUBERT (rédactrice santé) - 01.55.35.56.24
Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70

Documentation
Isabelle DO O'GOMES (cheffe de service) - 01.55.35.56.49
Astrid SAINT AUGUSTE - 01.55.35.56.48

Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr

Informatique
Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06

Comptabilité - Ressources humaines
Mélanie BENKHEDIMI - 01.55.35.56.14

Fabrication
Christophe Perrusson

Publicité
MediaObs. 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris
Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com

Directrice générale :
Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70
assistée de Marie-Noëlle MAGGIE - 01.44.88.93.70

Abonnements et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir
4, rue de Mouchy 60438 Noailles cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros) : 35 €. 1 an complet (12 numéros + 4 hors-séries) : 48 €.
Tarifs pays étrangers sur demande.

Abonnements Belgique : Partner Press, tél. : 00.32.2.556.41.40 – www.viapresse.be

Directeur de publicité :
Sylvain MORTREUIL - 01.44.88.97.75

Directrice de clientèle et responsable Web :
Karine GROSSMAN - 01.44.88.89.08

Assistante commerciale :
Séverine LECLERC - 01.44.88.97.57

Exécution : Cédric AUBRY - 01.44.88.89.05

Administration des ventes :
Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20

Directeur commercial : Valéry SOURIEAU

Partenariat: Joëlle HEZARD - 01.58.65.09.99

Directeur des abonnements
Luc BONARDI
Responsable des abonnements
Lina QUACH 01.55.35.56.63

Relations extérieures :
Marianne BOULAT - 01.70.98.19.66

Sciences et Avenir SAS
Président, Directeur de la publication : **Claude PERDRIEL**
Secrétaire général :
Jean-Claude ROSSIGNOL
Multimédia : Sciences et Avenir, 41 bis, avenue Bosquet, 75007 Paris.
Tél. : 01.55.35.56.00.

PEFC 10-31-3364 PEFC recyclé Ce produit est issu de sources recyclées et contrôlées pefc-france.org

Origine du papier : Italie
Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,017 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Newsprint (Lieusaint), certifié PEFC

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comprend : un encart « objet du mois l'Obs » jeté sur couverture en diffusion totale des abonnés ainsi que les messages « Télé 7 jours », « Challenges » et « SFM » jetés sur couverture en diffusion partielle des abonnés. Commission paritaire n° 0620 K 79712. ISSN 00368636. Distribué par Presstalis.

CITROËN

Pic de la
DÉTENTE
2500 M

GAMME SUV CITROËN

SMOOTH UNIQUE VEHICLES

CITROËN ADVANCED COMFORT

SUV CITROËN C3 AIRCROSS

12 aides à la conduite*
Toit ouvrant vitré panoramique*
Volume de coffre jusqu'à 520 L*
Grip Control avec Hill Assist Descent*
Banquette arrière coulissante en 2 parties*

SUV CITROËN C5 AIRCROSS

20 aides à la conduite*
Grip Control avec Hill Assist Descent*
Volume de coffre record jusqu'à 720 L*
3 sièges arrière indépendants et de même largeur
Suspensions avec Butées Hydrauliques Progressives®

Automobiles CITROËN : RCS Paris 642 050 199

INSPIRED BY YOU

Citroën préfère Total. *Équipement de série, en option ou non disponible selon les versions. ♦Détails sur citroen.fr.

CONSOMMATIONS MIXTES ET ÉMISSIONS DE CO_2 (SOUS RÉSERVE D'HOMOLOGATION) DE SUV CITROËN C3 AIRCROSS : NEDC CORRÉLÉ DE 4,0 À 5,0 L/100 KM ET DE 105 À 114 G/KM – WLTP DE 4,8 À 6,7 L/100 KM ET DE 125 À 151 G/KM ET DE SUV CITROËN C5 AIRCROSS : NEDC CORRÉLÉ DE 1,8 À 5,6L/100 KM ET DE 39 À 131G/KM – WLTP DE 1,4 À 7,5 L/100 KM ET DE 32 À 169 G/KM.

NOUVEAUX MOTEURS EURO 6 DISPONIBLES IMMÉDIATEMENT♦

SOMMAIRE

Sciences et Avenir / N° 876 / Février 2020

DOSSIER P. 30

Mal de dos
pourquoi il faut bouger

Longtemps le repos a semblé le meilleur remède aux lombalgies. Aujourd'hui, au contraire, c'est l'activité physique qui est bénéfique, nous expliquent les spécialistes. Leurs conseils pour adopter la bonne attitude face au mal de dos et le prévenir.

7 **Édito** par Dominique Leglu

11 **Courrier**

ÉVÉNEMENT

12 **Les grands rendez-vous de 2020**

SCIENCES FONDAMENTALES

18 **ACTUALITÉS** / L'étoile Bételgeuse pourrait exploser / La navette moléculaire la plus rapide au monde / Le pôle nord file à l'est

42 **L'histoire du système solaire se lit dans les roches**

46 **ExoMars, un atterrissage à haut risque**

49 **À la recherche des étoiles perdues**

50 **Interview : Jean Philippe Uzan, cosmologiste**

HISTOIRE

20 **ACTUALITÉS** / Un portrait-robot préhistorique révélé par un « chewing-gum » / Les singes de Santorin viennent d'Asie / L'extraordinaire bouclier celte de Pocklington

52 **Kunara, rivale des cités de Mésopotamie**

56 **Qui a écrit quoi ? la preuve par l'algorithme**

59 **Les Papous, une mémoire de l'humanité**

NATURE

22 **ACTUALITÉS** / Les plantes en détresse émettraient des ultrasons / La danse de la guerre des suricates / La fermeture parfaite des bénitiers expliquée par la physique

60 **Après l'Australie, des mégafeux menacent-ils la France ?**

64 **Le ver de terre, acteur primordial de la fertilité des sols**

67 **Sous les glaces de l'Antarctique**

68 **Portrait : Jérôme Chappellaz, glaciologue**

Kunara, la capitale du royaume des Lullubi mise au jour au Kurdistan irakien p. 52

Les mégafeux qui ont ravagé l'Australie pourraient avoir lieu en France, alertent des experts p. 60

Devenir ingénieur(e) : 7 secteurs porteurs dans les nouvelles technologies p. 85

SANTÉ

24 **ACTUALITÉS** / Pour la grippe, c'est la première fois qui compte / Mère et bébé synchronisent leurs cerveaux / Un astronaute traité dans l'espace pour un caillot sanguin

70 **Traquer les métastases à la cellule près**

74 **Nutrition : Et si on mangeait des algues…**

76 **Les virus géants au cœur de l'évolution humaine**

79 **Les ratés de l'expérience des « bébés CRISPR »**

80 **Dossier spécial : 5 questions pour apprivoiser le stress**

HIGH-TECH

26 **ACTUALITÉS** / CES 2020 de Las Vegas : 5 technologies inédites / Facebook à l'assaut des « deepfakes » / La 10e symphonie de Beethoven sera achevée par une intelligence artificielle

85 **Devenir ingénieur(e) : Pour changer le monde**

94 **Comment ça marche : Le sésame des serrures connectées**

96 **Le tourisme spatial prend forme**

RENDEZ-VOUS

98 **Le ciel de février**

100 **Livres**

102 **Expositions**

103 **Questions de lecteurs**

104 **Décryptage : Que traite le médicament le plus cher du monde ?**

106 **L'info en continu sur sciencesetavenir.fr**

SPL/BSIP, AKG IMAGE, MATTHEW ABBOTT/THE NEW YORK TIMES REDUX - REA, HAMILTON/REA

Solgardez votre sommeil !

SOLGAR
Since 1947

Le flacon d'or Solgar
contient de la mélatonine
qui contribue à réduire le
temps d'endormissement et les
effets du décalage horaire.

Pour votre santé, mangez au moins cinq fruits et légumes par jour. www.mangerbouger.fr

solgar.fr

COURRIER

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

« Le réchauffement climatique en équations »
(*Sciences et Avenir* n° 875, janvier 2020)

Fidèle abonné et lecteur de votre revue très appréciée depuis de longues années, je m'interroge à propos de l'article concernant les simulations numériques sur le climat, paru dans votre numéro de janvier. Il y est indiqué que le travail fourni par le CNRS, le CEA et Météo France a été de 500 millions d'heures sur les supercalculateurs. S'il s'agit d'heures d'ordinateurs, cela représente 500 millions/8760 heures par an = 57 000 années-ordinateur, même avec 1000 appareils en parallèle, cela ferait 57 années ! Comment est-ce possible ?

Philippe Bouilloud

Réponse de David Salas y Melia, chercheurs Météo France : Il ne s'agit pas d'heures de travail réalisées par un humain mais d'heures de calcul. Côté Météo France, nous avons utilisé 200 millions d'heures de calcul pour réaliser l'exercice lui-même, et l'IPSL (CEA-CNRS), 300 millions sur d'autres machines. Celles de Météo France peuvent fournir environ 1 milliard d'heures de calcul par an grâce à 144 000 processeurs en parallèle. Nous avons utilisé, pendant deux ans, environ 10 % de la puissance de calcul des machines de Météo-France, soit environ 100 millions d'heures par an.

Spores ou pollen

Dans l'article « Le fabuleux destin des papillons » (*S. et A.* n° 875), vous indiquez par erreur que les premiers papillons devaient se nourrir de pollen de fougères. Or celles-ci produisent des spores. Dans le cycle de reproduction des fougères, la grande plante visible est le sporophyte qui est l'organisme producteur de spores. Celles-ci sont disséminées et germent en donnant un gamétophyte tout petit appelé prothalle qui, lui, donne des gamètes mâles et femelles. Après fécondation, une vraie fougère pourra alors naître…

Gérard Tremblin

S. et A. : Effectivement, les fougères n'ont que des spores, le pollen étant l'apanage des plantes à graines. Les papillons de la fin du carbonifère grignotaient peut-être du pollen, mais c'était celui de plantes gymnospermes.

Erratum

Dans la sélection des « beaux livres » (*S. et A.* n° 875, p. 101), le visuel illustrant la couverture du livre *Quand l'Orient regarde l'Occident* n'est pas le bon. Il correspond à un autre ouvrage traitant, lui aussi, des routes de la soie.

Les grands rendez-vous de 2020

Conférences internationales, chantiers, thérapeutiques, exploration spatiale, nouvelles technologies… la rédaction de *Sciences et Avenir* présente l'agenda des sciences pour la nouvelle année.

High-tech

Le retour du supersonique
Le nouvel avion supersonique de la Nasa développé par Lockheed Martin sera assemblé cette année. Sa promesse : un « bang » lors du passage du mur du son qui, au sol, ne serait pas plus bruyant qu'un claquement de porte. **M. N.**

Alerte aux « fake news »
Plus que jamais, l'élection présidentielle américaine qui aura lieu en novembre promet d'être perturbée par les manipulations de l'opinion publique opérées par les bots, ces comptes automatiques utilisés pour la propagande massive sur les réseaux sociaux et la diffusion de fausses informations. **O. H.**

Premières villes couvertes par la 5G
La 5G, avec ses promesses de débits plus importants et de temps de réponse réduits, doit se déployer cette année en France : les enchères pour l'attribution des fréquences auront lieu au premier trimestre. **O. H.**

Les voitures se passent de conducteur
L'Américain Elon Musk a annoncé pour la fin de l'année la mise en circulation de robots taxis Tesla complètement autonomes, ne nécessitant aucune intervention humaine. **A. D.**

Santé

Un nouveau médicament contre Alzheimer ?
Si le laboratoire américain Eisai reçoit l'autorisation de mettre en vente l'aducanumab, potentiellement efficace contre le déclin cognitif des patients atteints de la maladie d'Alzheimer, il pourra être prescrit au stade le plus précoce, aux États-Unis du moins. **E. S.**

La dépression gagne du terrain
Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), la dépression sera cette année la deuxième cause de maladie et d'incapacité après les maladies cardio-vasculaires. **E. S.**

Les cigarettes à 10 euros
Dans le cadre du Plan national de mobilisation contre les addictions 2018-2022, le paquet de 20 cigarettes passera en France à 10 euros. **E. S.**

Une étude pour réduire le stress après les attentats
Les résultats de l'étude Paris : Mémoire vive sont attendus pour décembre. Elle a consisté à traiter 300 patients souffrant de troubles de stress post-traumatique après les attentats de 2015, avec un médicament (propanolol) bloquant la « reconsolidation mnésique ». **E. S.**

Trois thérapies géniques attendues en France
Trois thérapies géniques sont attendues dans le courant de l'année. Maladies ciblées : l'amyotrophie spinale (Novartis), la drépanocytose et la bêta-thalassémie (Bluebird bio). **H. J.**

LOOCKEED MARTIN - ATELIER BRUECKNER - BSIP - M. CUGNOT/DIVERGENCE - AFP

Patrimoine

Le plus grand musée d'égyptologie
▸ C'est en grande pompe que devrait avoir lieu le 10 octobre l'inauguration du nouveau Grand Musée égyptien (GEM), à Guizeh, près du Caire. Elle devrait permettre d'accéder aux premières salles achevées des 500 000 m² qui abriteront certains des plus grands trésors de l'Égypte ancienne dont celui de Toutankhamon. **B. A.**

Reconstruction à Mossoul
▸ La reconstruction de la mosquée de Mossoul Al-Nouri et de son minaret (Irak) va commencer sous l'égide de l'Unesco. Le monument datant du XIIe siècle a été détruit par des djihadistes en juin 2017. L'objectif est qu'il rouvre ses portes en 2023. **M. N.**

Fermeture du palais de la Découverte
▸ Créé en 1937 par le physicien Jean Perrin, prix Nobel de physique 1926, le palais de la Découverte à Paris fermera ses portes le 30 août. Il devrait renaître sous une forme nouvelle en 2024 après la rénovation complète du Grand Palais. **M. N.**

On va — peut-être — retrouver Montaigne
▸ Les fouilles du cercueil en plomb contenant la probable dépouille de Montaigne (1533-1592) reprendront en avril dans les sous-sol du musée d'Aquitaine à Bordeaux où il a été retrouvé. L'équipe interdisciplinaire dirigée par l'archéo-anthropologue Hélène Réveillas, du Centre d'archéologie préventive de Bordeaux-Métropole, effectuera des prélèvements d'ADN sur les ossements. **C. C.**

Espace

Des échantillons d'astéroïdes prélevés et rapatriés
▸ En août, la sonde américaine Osiris-Rex prélèvera entre 60 g et 2 kg de matière sur l'astéroïde Bennu. Quatre mois plus tard, la mission japonaise Hayabusa-2 collectera d'autres échantillons sur Ryugu. **F. D.**

L'image de notre trou noir
▸ Constitué d'une douzaine d'instruments terrestres en réseau, l'Event Horizon Telescope pourrait dévoiler la première photo de Sagittarius A*, le trou noir de notre galaxie. **A. Kh.**

La Chine s'installe dans l'espace
▸ La Chine devrait commencer l'assemblage de Tiangong 3, une grande station orbitale de plus de 60 tonnes. Ce sera la première pour ce pays à accueillir des équipages en permanence. **S. R.**

Une première exploration du sous-sol lunaire
▸ La Chine poursuit son exploration lunaire avec un retour d'échantillons : un atterrisseur doit en collecter 2 kg à deux mètres sous la surface ! **S. R.**

Nature

Fermeture de la centrale de Fessenheim
▸ Le 22 février, un premier réacteur de la centrale nucléaire de Fessenheim (Haut-Rhin) sera définitivement arrêté. Le 30 juin ce sera au tour du second. Une première depuis l'arrêt de Chooz A (Ardennes) en 1991. **L. C.**

COP26 : l'heure de l'engagement
▸ Du 9 au 20 novembre, lors de la COP26 à Glasgow (Écosse), les États devront présenter leurs nouveaux engagements pour la réduction des gaz à effet de serre. Leurs actions feront l'objet d'une vérification quinquennale. **L. C.**

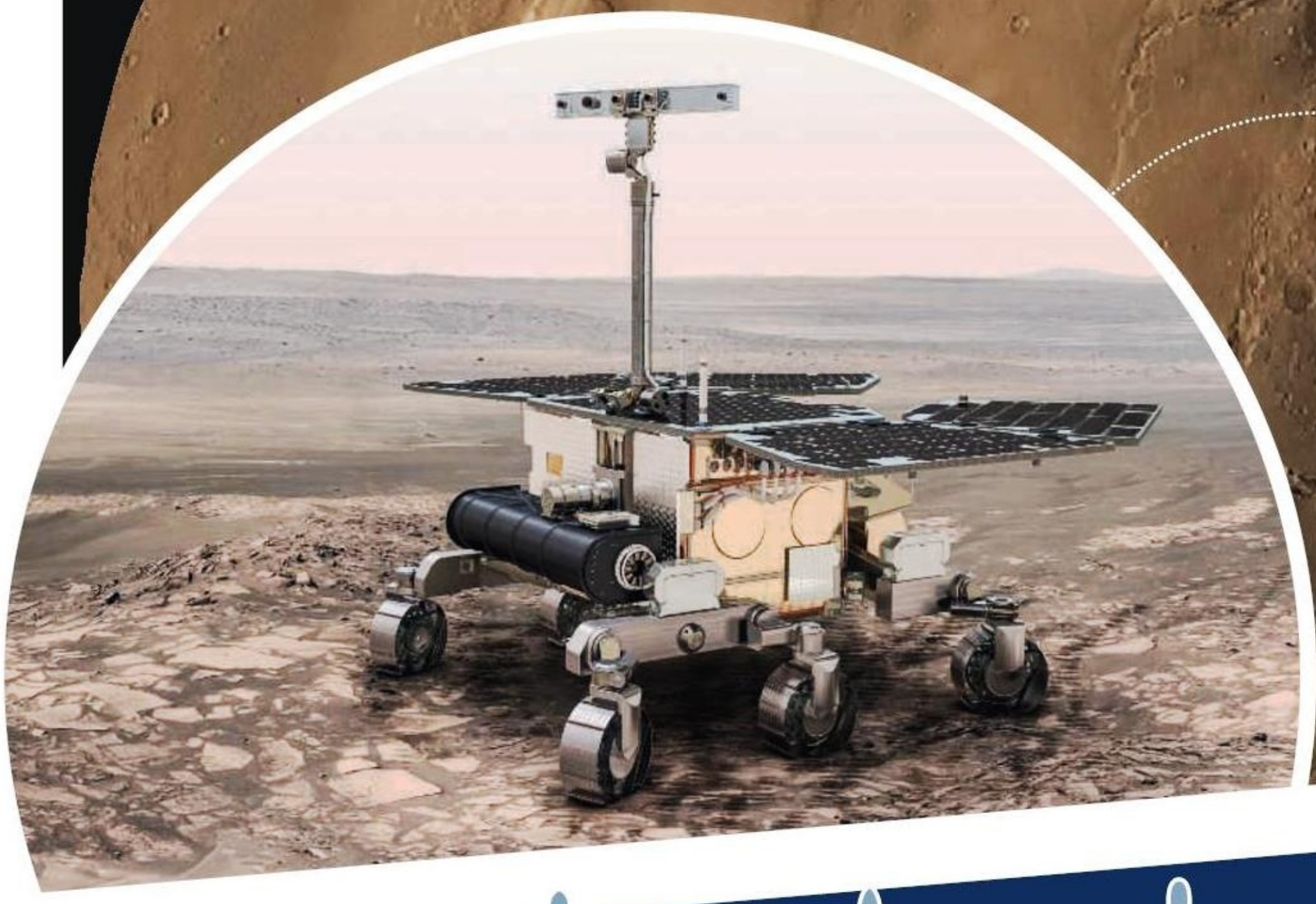
Les États-Unis sortiraient de l'accord de Paris
▸ Si Donald Trump est réélu le 4 novembre, les États-Unis sortiront dès le lendemain de l'accord de Paris sur le changement climatique. Si un candidat démocrate est élu, il pourra renoncer à cette mesure. **L. C.**

La caravane du Tour de France s'électrifie
▸ Après les véhicules de presse en 2019, l'ensemble des voitures de la caravane du Tour de France va progressivement sortir du tout pétrole. Enedis équipe les villes étapes de sites de recharge. **L. C.**

2020 : objectif Mars

Cette année, la planète Rouge ne sera distante « que » de 62,1 millions de kilomètres de la Terre, contre 400 millions quand elle est au plus loin. Profitant de cette configuration, pas moins de quatre missions doivent partir cet été pour une arrivée prévue en 2021, parmi lesquelles la première sonde d'exploration planétaire des Émirats arabes unis. Trois nouveaux rovers vont rejoindre Curiosity, seul astromobile encore en activité sur Mars.

Par Sylvie Rouat @srouat1



HUOXING 1

Site d'atterrissage : Chryse Planitia ou Isidis Planitia.

Mission : étude de l'environnement martien et recherche d'indices de vie passée.

Composition : orbiteur de 3 tonnes et rover de 240 kg, doté d'un laser et d'un radar pour sonder le sous-sol jusqu'à 100 m de profondeur.

Durée : 3 mois (rover).

EXOMARS

Site d'atterrissage : Oxia Planum, près de l'équateur.

Mission : recherche d'indices d'une vie passée ou présente sur la planète.

Composition : plate-forme de descente et d'atterrissage russe Kazachok (« petit cosaque ») et rover européen Rosalind-Franklin de 310 kg. Ce dernier pourra prélever des carottes jusqu'à -2 m, qui seront ensuite analysées par les divers instruments embarqués.

Durée : 2 ans *(Lire aussi p. 46.)*

Un festival de nouveaux lanceurs

FIREFLY ALPHA

29 mètres

Développé par la start-up Firefly Aerospace, ce lanceur léger placera jusqu'à 1000 kg en orbite basse, à 500 km.

VEGA C

30 mètres

Cette nouvelle version du petit lanceur de l'ESA pourra emporter jusqu'à 2200 kg en orbite basse, jusqu'à 700 km.

SMALL SATELLITE LAUNCH VEHICLE

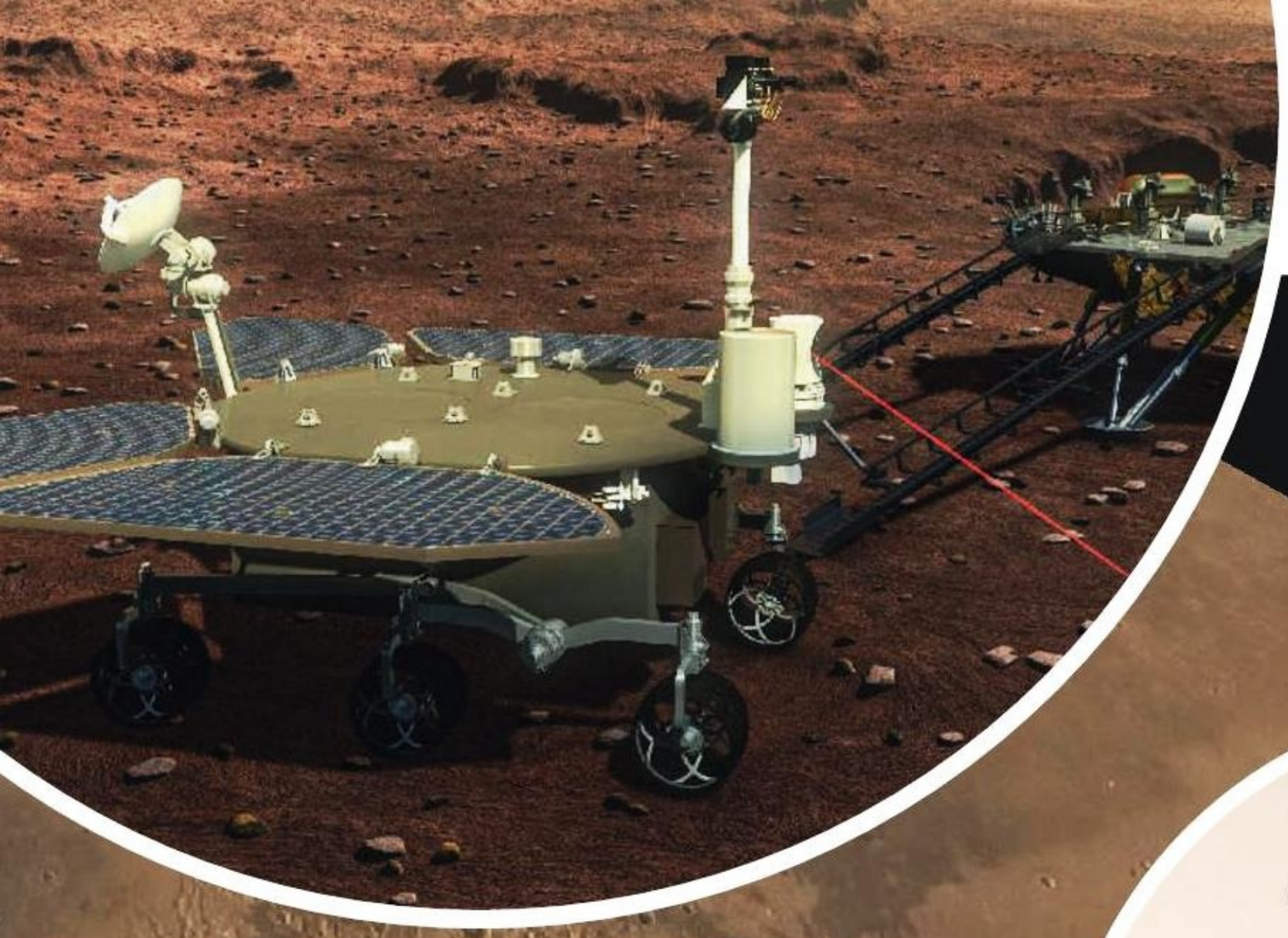
34 mètres

L'Inde se dote d'un petit lanceur pour insérer jusqu'à 500 kg en orbite basse jusqu'à 500 km.

LONGUE MARCHE 8

48 mètres

Ce lanceur chinois sera en partie réutilisable, le premier étage et les propulseurs revenant se poser à la verticale.



MARS HOPE OU AL-AMAL

Mission : étude de l'atmosphère martienne

Composition : orbiteur de 1,5 tonne équipé d'une caméra et de spectromètres infrarouge et ultraviolet.

Durée : 2 ans.

MARS 2020

Site d'atterrissage : cratère Jezero, qui aurait abrité un lac il y a 3 à 4 milliards d'années.

Mission : collecte d'échantillons pour une future mission de retour sur Terre à partir de 2026. Recherche de signatures biologiques. Test de production d'ergols (mélange de carburant et comburant pour alimenter des moteurs d'astronefs) et d'oxygène à partir de l'atmosphère martienne.

Composition : rover de 1050 kg, équipé d'un bras porte-outils pour analyser *in situ* les échantillons collectés, et petit hélicoptère Mars Helicopter Scout, pour des vols de reconnaissance afin de préparer le trajet du rover.

Durée : 2 ans (30 jours pour l'hélicoptère).

H3

63 mètres

Le Japon remplacera dès 2022 son lanceur actuel H-IIA par H3, afin de s'imposer sur le marché des lancements spatiaux.

ARIANE 6

63 mètres

Ce nouveau lanceur européen remplacera d'ici à 2023 Ariane 5, afin de réduire de 30 % les coûts de lancement.

SUPER HEAVY ROCKET

118 mètres

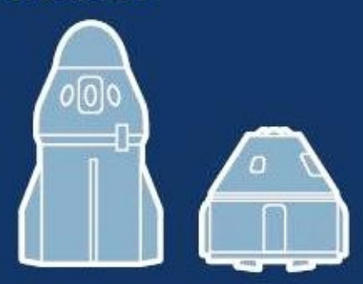
Le lanceur lourd de SpaceX et son vaisseau Starship, desserviront la Lune et Mars. *(lire p. 96.)*

SLS (SPACE LAUNCH SYSTEM)

121 mètres

Le lanceur SLS et sa capsule Orion sont conçus pour les futures missions lunaires.

Retour au vol habité



Les capsules Crew Dragon et CST-100 Starliner des opérateurs privés américains SpaceX et Boeing doivent réaliser l'une et l'autre et pour le compte de la Nasa un premier vol de certification. Objectif : la reprise de la desserte de la Station spatiale internationale.

NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY, MOLA, MSS, NASA - ESA - NASA - AFP - EMIRATES MARS MISSION/INFOGRAPHIES : BRUNO BOURGEOIS

Croisière Spitzberg

LES POINTS FORTS

- **Passage du cercle polaire arctique** avec remise de diplôme
- **Archipel des îles Lofoten** avec ses vestiges vikings et ses colonies d'oiseaux rares dont l'aigle de mer
- **Navigation dans la Baie de la Madeleine** au cœur des plus beaux glaciers et icebergs, paradis de la faune arctique
- **Cap Nord et soleil de minuit**
- **8 conférences d'experts** du Grand Nord
- **Croisière francophone :** Directeur de croisière, ateliers, conférences, excursions...
- **A la meilleure période** de l'année

NAVIGUEZ A BORD DU LÉGENDAIRE

Récemment rénové, l'Astoria conserve tout **le charme des navires d'autrefois,** de ceux qui ont une âme. Cet élégant paquebot d'inspiration Art déco est **un navire à taille humaine,** qui offre de la **chaleur** et de la **convivialité.** Parfaitement adapté à la navigation de haute-mer, il est également **idéal pour naviguer dans les fjords** parmi les icebergs, et près des côtes **pour découvrir la faune polaire.**

Rivages du Monde

VERS LE GRAND NORD NORVEGIEN

Pour pénétrer au cœur de l'océan Arctique…

Jusqu'à la baie de la Madeleine, point d'orgue de la croisière, le Spitzberg offre **une nature sauvage,** encore préservée, **d'une incroyable beauté** et d'une grande fragilité.

Sur la trace des baleiniers, **découvrez cette terre polaire** riche de glaciers qui se jettent dans l'océan et **sanctuaire mondial des ours polaires.** En plus des sommets enneigés d'un blanc immaculé, vous apprécierez les couleurs vives des maisons de Tromso et des **villages de pêcheurs des îles Lofoten** nichés au fond des **fjords de Norvège les plus grandioses** et, au cap Nord, **le mythique soleil de minuit.**

M/S ASTORIA

DEMANDE DE DOCUMENTATION **GRATUITE**

☑ **Je souhaite plus d'information sur la croisière SPITZBERG de Rivages du Monde**

- **Par courrier** à Rivages du Monde - 19 rue du 4 septembre - 75002 Paris
- **Par e-mail** à info@rivagesdumonde.fr
- **Par téléphone** au 01 58 36 08 36

SANS ENGAGEMENT DE VOTRE PART

MES COORDONNÉES M. ☐ MME. ☐ **VOUS VOYAGEZ** EN COUPLE ☐ SEUL(E) ☐ ENTRE AMIS ☐

NOM PRÉNOM

ADRESSE

CODE POSTAL VILLE PAYS

COURRIEL TÉLÉPHONE

☐ J'accepte de recevoir des informations et offres commerciales de Rivages du Monde par voie electronique

Mentions CNIL : Ces informations sont enregistrées dans le fichier Rivages du Monde pour traiter votre demande de brochures et/ou votre commande. Conformément à la loi « Informatique et Libertés » du 6 /01/78 modifiée et au RGPD du 27/04/16, elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification à l'adresse suivante : Rivages du Monde 19 rue du Quatre-Septembre, 75002 Paris. Notre Politique de Confidentialité est disponible sur le site : www.rivagesdumonde.fr. Vos données postales sont susceptibles d'être transmises à nos partenaires commerciaux, si vous ne le souhaitez pas, cochez cette case ☐

SASU Rivages du Monde - RCS Paris B 438 679 664 - Immatriculation Atout France : IM075100099 - RCP Hiscox N° police : HARCP0087439 - Garantie financière : GROUPAMA-ASSURANCES CRÉDIT N° police : 4000713765/2. Immatriculé à l'ORIAS dans la catégorie Mandataire d'intermédiaire d'assurance (MIA) sous le N° 19003053 - www.orias.fr. Crédit photos Getty.

SCAVE01

L'étoile Bételgeuse pourrait exploser

Cette géante rouge de la constellation d'Orion formerait alors une supernova.

Située à 6000 années-lumière de la Terre, Bételgeuse présente une luminosité en baisse constante depuis quelques mois (vue d'artiste à partir des observations du Very Large Telescope au Chili).

ESO/L. CALÇADA

ASTRONOMIE Et si l'explosion de Bételgeuse, une géante rouge dans la constellation d'Orion, était imminente ? Depuis quelques mois, sa luminosité n'a cessé de diminuer jusqu'à atteindre son niveau le plus bas depuis cinquante ans. Située à 600 années-lumière et représentant 15 fois la masse solaire, l'étoile est de celles qui devraient, selon l'astrophysique, évoluer rapidement et finir par une explosion formant une supernova. Cet événement rare — on en compte moins de trois par siècle dans la Voie lactée — pourrait survenir à tout moment. L'étoile deviendrait pendant quelques semaines aussi lumineuse que la pleine Lune. Mais pour Pierre Kervellade, de l'observatoire de Paris, le feu d'artifice n'est peut-être pas pour tout de suite : « *Bételgeuse a éjecté du gaz qui s'est condensé en poussière*, précise-t-il. *C'est cette poussière qui absorberait la lumière de l'étoile dans les longueurs d'onde du visible, ce qui pourrait expliquer sa baisse de luminosité actuelle.* » En d'autres termes, Bételgeuse ne connaîtrait pour l'instant qu'un hoquet géant. **A. Kh.**

EN DEUX MOTS

PARITÉ. La nouvelle promotion d'astronautes de la Nasa tend vers la parité : six femmes pour sept hommes, choisis parmi 18 300 candidats. **MARS.** Des données gravimétriques suggèrent qu'un continent ancien serait caché sous la surface de la planète Rouge. **EXOPLANÈTES.** Le satellite de l'Agence spatiale européenne Cheops, dédié à l'étude des exoplanètes, a été mis en orbite en décembre.

LEEMAGE

La pluie d'étoiles filantes s'observe chaque mois de décembre.

À la source des Géminides

ASTRONOMIE La sonde Parker Solar Probe a observé pour la première fois la source de l'essaim météoritique qui provoque chaque année, à la mi-décembre, une pluie d'étoiles filantes — les Géminides. Il s'agit d'une immense traînée de débris rocheux et de poussières de 24 millions de kilomètres de long et 100 000 km de large. Elle provient de la matière éjectée par un étrange objet céleste, mi-astéroïde, mi-comète, dénommé Phaéton. **F. D.**

La navette moléculaire la plus rapide au monde

NANOSCIENCES Des chimistes de l'université d'Amsterdam (Pays-Bas) ont fabriqué une « navette moléculaire » battant tous les records de vitesse. Elle est constituée d'une sorte d'haltère avec un anneau (la navette) qui coulisse le long de la tige centrale. Déclenché par une impulsion lumineuse, un « harpon » s'accroche à l'anneau, le tire vers lui puis le relâche. Cet anneau parcourt sur commande, un nanomètre de distance en 30 milliardièmes de seconde. **F. D.**

HIMS/M. PARADIZ

3,7 milliards d'années

L'âge du champ magnétique

GÉOSCIENCES Au moment de l'émergence de la vie sur Terre, celle-ci avait déjà un champ magnétique. C'est ce qui ressort de l'étude de roches du Groenland âgées de 3,7 milliards d'années. Ce bouclier magnétique qui protège des particules énergétiques du Soleil fut probablement un facteur nécessaire à l'apparition du vivant. **A. Kh.**

SOURCE : CLAIRE NICHOLS, MIT, CAMBRIDGE, ROYAUME-UNI.

La croqueuse de météorite

CHIMIE Identifiée dans les eaux saumâtres et chaudes d'un lac volcanique, l'archée *Metallosphaera sedula* est capable de digérer les métaux contenus dans une météorite ! En particulier ceux de NWA 1172, récupérée en Afrique du nord-ouest et qui contient entre 15 et 25 % de métaux dont une forte part de fer. Mieux encore : elle dégrade plus vite le matériau extraterrestre que les minéraux de son environnement ! **J. I.**

SOURCE : TETYANA MILOJEVIC, UNIVERSITÉ DE VIENNE, AUTRICHE.

T. MILOJEVIC ET AL.

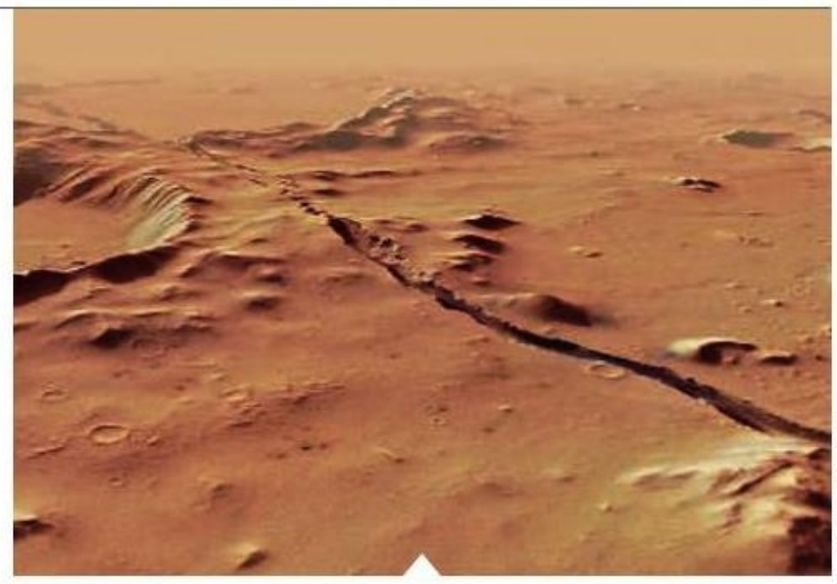
Le micro-organisme colonise et se nourrit des métaux contenus dans la météorite NWA 1172.

890 milliards de masses solaires

La masse de la Voie lactée

ASTROPHYSIQUE **Cette nouvelle estimation, proposée avec une marge d'erreur de 10 %, a été déduite du mouvement des astres au sein de notre galaxie. L'essentiel de cette masse est dû à la matière noire, les étoiles et les planètes que nous percevons dans le ciel ne cumulant que 60 milliards de masses solaires. A. Kh.**

SOURCE : E.V. KARUKES, CENTRE ASTRONOMIQUE NICOLAS COPERNIC, VARSOVIE, POLOGNE.



ESO, DLR, FU BERLIN

Une faille des fosses de Cerbère vue par Mars Express.

La première zone sismique identifiée sur Mars

EXOSISMOLOGIE Un an après la mise en route du sismomètre de la mission InSight sur la planète Rouge, 322 tremblements de Mars ont été enregistrés. La plupart sont de faible intensité et issus de la croûte. Mais deux, détectés en mai et juillet 2019, possèdent une magnitude proche de 4 et proviennent manifestement du manteau. Ils semblent avoir la même source : les fosses de Cerbère, À 1600 km à l'est de l'instrument. **F. D.**

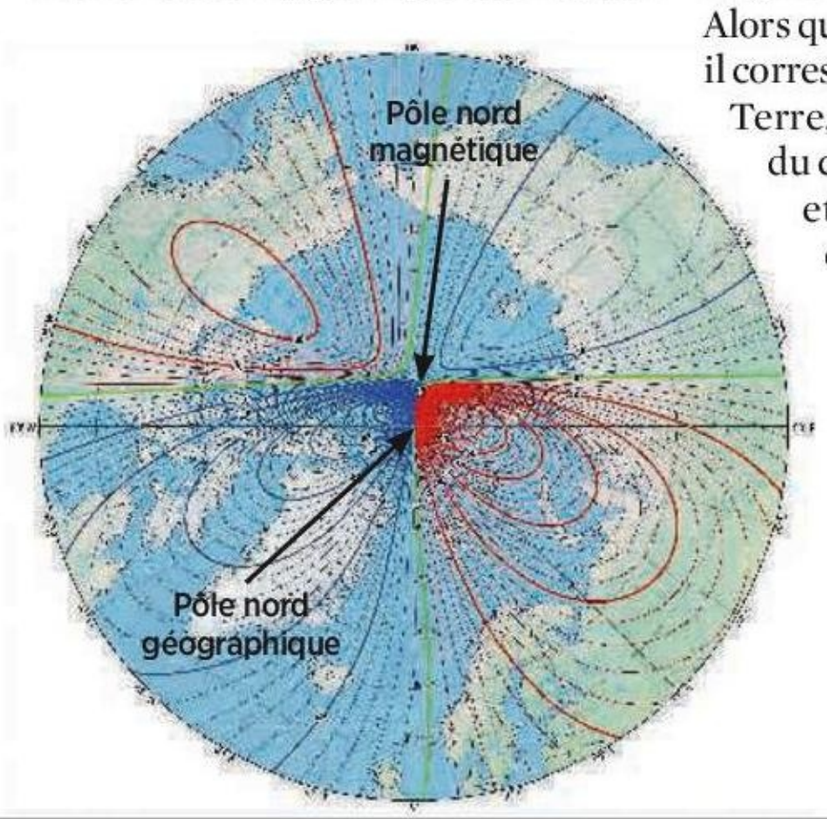
SOURCE : D. GIARDINI, EPFL DE ZURICH, SUISSE.

Le pôle nord file à l'est

La carte magnétique mondiale 2020 apporte une information indispensable pour la navigation aérienne.

GÉOSCIENCES Le nord magnétique continue de filer vers l'est en direction de la Sibérie ! Ce déplacement, entamé il y a environ deux décennies à raison de 55 km/an, a cependant ralenti : sa vitesse est désormais de l'ordre de 40 km par an. Ce résultat vient d'être transcrit sur la nouvelle carte magnétique du Bureau géologique britannique (British Geological Survey) et des Centres américains pour l'information environnementale (NCEI). Cette carte donne l'emplacement des pôles magnétiques et la valeur de la déclinaison magnétique — l'angle entre le nord géographique et le nord magnétique — à la surface du globe. Alors que le premier pôle est fixe car il correspond à l'axe de rotation de la Terre, le second varie en fonction du champ magnétique terrestre, et de ce fait l'angle entre les deux varie aussi. La mise à jour de la carte, qui se fait en pratique tous les 5 ans, est primordiale pour la navigation aérienne où, malgré le GPS, il est toujours exigé de savoir se référer aux boussoles. **A. Kh.**

NOAA NCEI/CIRES



◀ **La nouvelle position** du pôle nord magnétique, qui se déplace vers l'est, à raison de 40 km/an.

L'œil de Lascar

LA COMPAGNIE CANADIENNE Hyperstealth Biotechnology a mis au point un matériau capable de rendre invisible les objets placés derrière lui. Semblable à une plaque de Plexiglas, ce « Quantum Stealth » procède par déformation des rayons lumineux. **O. L.**

Les dinosaures avaient des poux!

TAIPING GAO

Nymphe de pou sur une plume de dinosaure pris dans un bloc d'ambre.

PALÉONTOLOGIE Des poux squattaient les plumes des nombreuses espèces qui vivaient au crétacé entre -145 et -66 millions d'années. Les scientifiques en ont eu la preuve en inspectant un morceau d'ambre de Birmanie dans lequel étaient figées une dizaine de nymphes d'insectes autour de plumes d'un dinosaure. Ces nymphes se sont révélées similaires à celles des poux qui parasitent les plumes des oiseaux modernes. **J. I.**

SOURCE : TAIPING GAO, UNIVERSITÉ NORMALE DE LA CAPITALE À PÉKIN, CHINE.

T. BJÖRKLUND - THEIS JENSEN

1 cm

L'aspect physique d'une jeune fille du néolithique a été révélé grâce à de la poix de bouleau qu'elle avait mastiquée (ci-dessus).

Un portrait-robot préhistorique révélé par un « chewing-gum »

Un visage a été reconstitué à partir d'ADN contenu dans une substance mâchée il y a 5700 ans.

PRÉHISTOIRE « Lola » avait les yeux bleus et la peau sombre, vivait il y a 5700 ans dans l'actuel Danemark et mangeait probablement du canard et des noisettes. Voilà ce que révèle l'analyse d'un « chewing-gum » préhistorique (de la poix de bouleau, obtenue en chauffant l'écorce) incrusté d'ADN humain. Jusqu'ici, seuls des os ou des dents avaient livré des génomes humains. Le type physique — peau, cheveux foncés et yeux bleus — de la femme, supposée très jeune en raison de la petite taille des marques de dents, suggère *« que la propagation adaptative de la pigmentation de la peau claire dans les populations européennes ne s'est produite que plus tard dans la préhistoire »*, estiment les chercheurs du Globe Institute de l'université de Copenhague (Danemark).

Génétiquement plus proche des chasseurs-cueilleurs de l'Europe de l'ouest continentale que des agriculteurs du centre de la Scandinavie, Lola serait la preuve que ces *« groupes de chasseurs-cueilleurs génétiquement distincts ont survécu beaucoup plus longtemps que ce qui était supposé précédemment »*. **C. G.**

Une nécropole romaine de « 1000 tombes » en France

ANTIQUITÉ À Narbonne (Aude), une quarantaine d'archéologues de l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap) fouillent actuellement une nécropole romaine extraordinairement conservée. Elle renferme des sépultures quasi intactes — car protégées par une couche de limon de 3 mètres d'épaisseur — qui remontent au Ier-IIe siècle de notre ère. Outre les restes de défunts, les archéologues mettent au jour offrandes funéraires, vases, fioles ou bijoux. **B. A.**

D. GLIKSMAN/INRAP

Datées du Ier-IIe siècle, les tombes ont été dégagées d'une épaisse couche de limon.

-110 000 ans

L'époque où vivaient les derniers « Homo erectus »

PALÉOANTHROPOLOGIE Ils ont vécu sur l'île de Java, en Indonésie et leurs os fossiles, découverts dans les années 1930, viennent enfin d'être datés. Les *Homo erectus* ont occupé la planète pendant près de 1,8 million d'années avant d'être supplantés par d'autres humains comme *H. neandertalensis* et *H. sapiens*. **J. I.**

SOURCE : YAN RIZAL, INSTITUT TECHNOLOGIQUE DE BANDUNG, INDONÉSIE.

COSMO WENMAN

À VOIR SUR LE NET

La version numérique de Néfertiti librement consultable

ÉGYPTOLOGIE Les scans 3D du buste de Néfertiti sont désormais consultables par tout le monde. Ils faisaient partie des collections du Neues Museum de Berlin (Allemagne) mais l'artiste et consultant américain Cosmo Wenman les a obtenus et mis en ligne, après trois ans de bataille juridique au nom de la liberté de l'information. Fin 2019, il a entrepris une démarche similaire auprès du musée Rodin de Paris. **A. D.** sciav.fr/867Nefertiti

R. HACKENBERG/AKG IMAGES

Les « singes bleus » d'Akrotiri seraient des langurs gris, une espèce vivant en Inde.

Les singes de Santorin viendraient d'Asie

ANTIQUITÉ À Akrotiri sur l'île de Santorin (Grèce), l'un des foyers de la civilisation minoenne (2700-1200 avant J.-C.), une fresque murale représentant des singes traditionnellement décrits comme originaires d'Égypte ou du Proche-Orient révélerait en réalité des contacts insoupçonnés. Une nouvelle étude y a en effet identifié des langurs gris (*Semonopithecus entellus*) seulement rencontrés au Népal et en Inde! Les Minoens de l'âge du bronze auraient donc pu avoir des contacts avec la lointaine civilisation de l'Indus. **B. A.**

SOURCE : MARIE PAREJA, UNIVERSITÉ DE PENNSYLVANIE, PHILADELPHIE, ÉTATS-UNIS.

IL A DIT

« Les œuvres d'art [prises au Bénin pendant la conquête coloniale et conservées au musée du Quai-Branly, à Paris] seront restituées dans le courant de 2020, peut-être au début de 2021 »

Franck Riester, ministre de la Culture, le 16 décembre 2019, lors de la rencontre à Cotonou d'Emmanuel Macron et du président du Bénin Patrice Talon.

L'extraordinaire bouclier celte de Pocklington

ARCHÉOLOGIE Les archéologues britanniques n'hésitent pas à parler de « découverte du siècle » : un char de guerre vieux de 2200 ans et les parties en bronze d'un bouclier dans un état exceptionnel de conservation ont été découverts au cœur de la nécropole celtique de Pocklington, dans l'est du Yorkshire. La sépulture de l'âge du fer est attribuée au peuple celtique des Parisii établi dans le nord de l'Angleterre, probablement lié aux Parisii de Gaule. **B. A.**

MAP ARCHEOLOGICAL PRACTICE

L'arme défensive, qui porte la trace d'un coup d'épée, a été utilisée au combat.

Une sépulture à double coque

ARCHÉOLOGIE

Ce ne sont pas un, mais deux bateaux-tombes vikings, emboîtés l'un dans l'autre, à cent ans d'intervalle, que des archéologues du muséum de Trondheim (Norvège) ont eu la surprise de découvrir sur le site de Skeiet, à Vinjeora, dans le centre de la Norvège. Aux VIIIe et IXe siècles, un bateau de 7 à 8 m contenant le corps d'une femme a été déposé dans celui de 10 m, où reposait un homme. B. A.

JUSTIN MOTT

QUESTIONS À

Maxime Aubert

Professeur de sciences archéologiques à l'université Griffith, Brisbane (Australie)

L'art pariétal se dévoile en Indonésie

Des peintures préhistoriques trouvées sur le site de Leang Bulu Sipong 4, sur l'île de Sulawesi (Indonésie) ont été datées de -44 000 ans par l'équipe de Maxime Aubert. Elles seraient les plus anciennes du monde.

L'Indonésie est-elle un berceau de l'art pariétal?
On ne peut pas l'affirmer mais les dernières découvertes nous portent à croire que cet art — autant en Indonésie qu'en Europe — a probablement une origine plus ancienne encore. Le berceau pourrait se trouver en Afrique.

Allez-vous procéder à d'autres datations pour confirmer l'ancienneté de ces peintures?
Nous avons daté quatre échantillons associés à cette peinture et ils se situent tous vers -40 000 ans. L'ensemble des figures picturales datées jusqu'à présent en Indonésie remontent au pléistocène [avant -11 700 ans]. Adam Brumm, qui effectue des fouilles sur l'île de Sulawesi dans une autre grotte ornée, a trouvé une grande quantité d'ocre rouge et de fragments de colliers et de pendentifs dans des niveaux d'occupations du même âge que les peintures. Ce qui signifie qu'à cette époque, il n'existait pas uniquement des peintures, mais d'autres éléments reliés à l'évolution cognitive de notre espèce.

Quel est votre prochain objectif?
Poursuivre les campagnes de datations sur les îles de Sulawesi et Bornéo, ainsi qu'explorer de nouveaux sites sur l'île de Misool (Papouasie occidentale, Indonésie) et en Nouvelle-Guinée.

Propos recueillis par B. A.

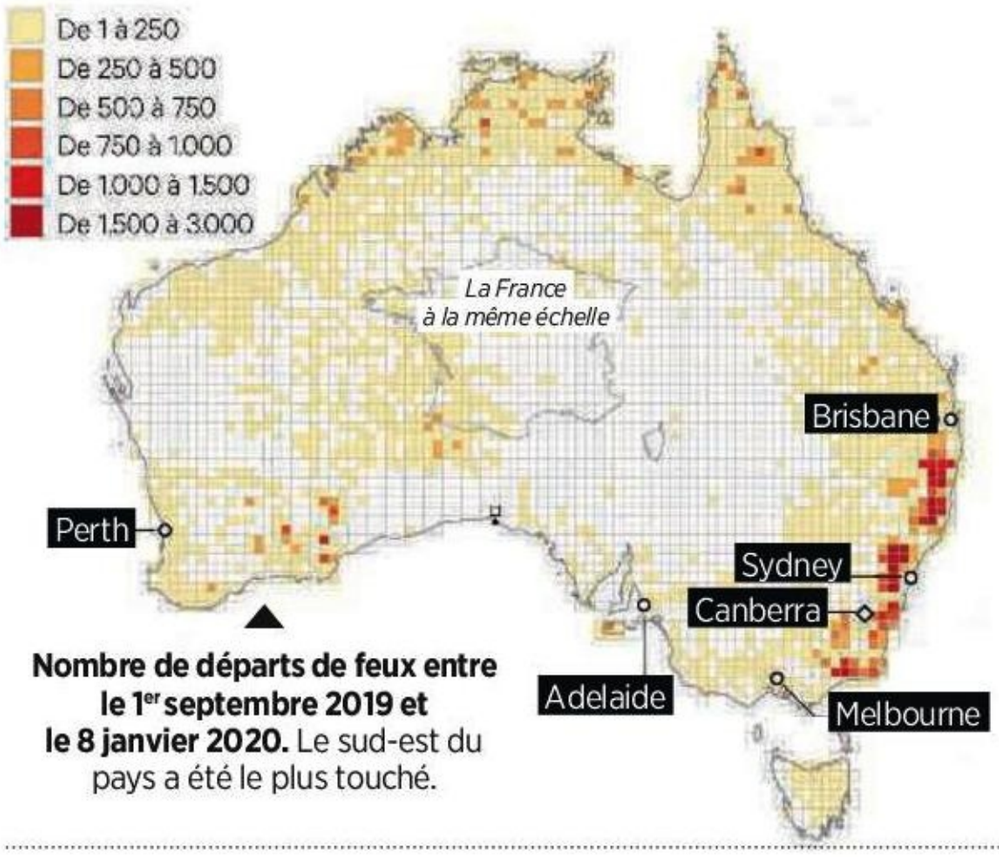
Les plantes en détresse émettraient des ultrasons

Des microphones ont capté des sons en réaction à la privation d'eau ou à la coupure de certaines tiges.

BIOS PHOTO

Les signaux émis par des plants de tomate pourraient être captés jusqu'à plusieurs mètres.

BOTANIQUE C'est une observation étonnante que l'on doit à une équipe de biologistes de l'université de Tel Aviv, en Israël : comme le font les humains et les animaux, les végétaux émettraient des sons lorsqu'ils se sentent menacés. Des bruits aériens ont en effet été enregistrés par des microphones placés à une dizaine de centimètres de plants de tomates ou de tabac. Les appareils ont capté des sons à une fréquence ultrasonique de 20 à 100 kHz après que les plantes ont été privées d'eau ou que certaines de leurs tiges ont été coupées. *« Les plantes stressées présentent des phénotypes altérés, y compris des changements de couleur, d'odeur et de forme »*, explique Itzhak Khait dans la présentation de l'étude, qui n'a pas encore été publiée dans une revue scientifique. Des sons qui pourraient même être détectés par certains animaux (souris, écureuils, chauves-souris) jusqu'à plusieurs mètres de distance. Une telle découverte pourrait, selon les chercheurs, *« ouvrir une voie nouvelle dans le domaine de l'agriculture de précision »*. **M. B.**



Nombre de départs de feux entre le 1er septembre 2019 et le 8 janvier 2020. Le sud-est du pays a été le plus touché.

LES ÉCHOS/SOURCES: NASA, MODIS C6

En Australie, des incendies sans précédent

BIODIVERSITÉ 24 personnes et plus d'un milliard d'animaux ont été tués entre septembre 2019 et janvier 2020, selon l'université de Sydney. Et 80 000 km² ravagés, soit l'équivalent de la Nouvelle-Aquitaine, la plus vaste région française. Pour comparaison, en 2019, les feux de Sibérie ont consumé 27 113 km² et ceux d'Amazonie 8904 km². *(Lire aussi p. 60.)* **R.M.**

Les sols de Fukushima neuf ans après

9000 km²
La surface décontaminée.

8 ans
La durée de l'opération.

5 cm
L'épaisseur du décapage.

20 millions de mètres cubes
Le volume de déchets stockés sans destination finale.

80 %
La réduction de la teneur en césium radioactif, l'élément le plus dangereux pour la santé humaine.

24 milliards d'euros
Le coût de l'opération.
L. C.

SOURCE : OLIVIER ÉVRARD, UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY, GIF-SUR-YVETTE.

La pollution altère le cycle menstruel

ENVIRONNEMENT Le cycle menstruel pourrait être modifié par la pollution atmosphérique, révèle une étude française sur 184 femmes. La durée de la phase folliculaire (première phase du cycle menstruel, menant à l'ovulation) s'allonge en moyenne de respectivement 0,7 et 1,6 jour pour chaque augmentation de 10 microgrammes par mètre cube de dioxyde d'azote et de particules fines dans l'air durant le mois précédant le cycle. Cela pourrait affecter la fécondité. **C. G.**

SOURCE : LISE GIORGIS-ALLEMAND INSTITUTE FOR ADVANCED BIOSCIENCES, GRENOBLE.

Une éponge contre les microgouttelettes de pétrole dans l'océan

POLLUTION Capables d'absorber le pétrole dans l'eau, les éponges « piégeuses d'hydrocarbures » n'étaient jusqu'ici efficaces que sur les nappes, et non sur les gouttelettes. Mais ces microquantités de pétrole ont désormais leur ennemie : une éponge en mousse de polyuréthane, qui peut absorber 90 % d'entre elles en seulement 10 minutes. **M. B.**

SOURCE : PAVANI CHERUKUPALLY, UNIVERSITÉ DE TORONTO, CANADA.

L'orientation dépend de l'horloge interne

RYTHME CIRCADIEN Les souris trouvent plus facilement leur chemin dans un labyrinthe plongé dans l'obscurité… la nuit ! C'est la conclusion d'une étude finlandaise qui a placé des souris dans un labyrinthe totalement obscurci de jour comme de nuit. D'après les scientifiques, plus que le sens visuel, l'horloge interne jouerait un rôle clé dans le sens de l'orientation de cet animal nocturne. **H. R.**

SOURCE : PETRI ALA-LAURILA, UNIVERSITÉ D'HELSINSKI, FINLANDE.

Les passereaux se passent d'un chromosome

BIOSPHOTO

Le diamant mandarin, un passereau d'Australie.

GÉNÉTIQUE **Les passereaux, soit la moitié des espèces d'oiseaux, n'ont pas le même nombre de chromosomes dans toutes leurs cellules ! Celles qui servent à la reproduction en ont un de plus que les autres. Ce chromosome n'intervient que dans le développement des cellules reproductrices, et son absence dans les autres cellules pourrait éviter la formation de cellules cancéreuses. P. K.**

SOURCE : CORMAC KINSELLA, UNIVERSITÉ D'UPPSALA, SUÈDE.

La danse de la guerre des suricates

ÉTHOLOGIE Pour intimider les clans adverses, les suricates adoptent différents comportements dont l'étonnante exécution d'une « danse de la guerre ». Au cours de celle-ci, ces mammifères du sud-ouest de l'Afrique lèvent leur queue et gonflent leur fourrure, sûrement pour paraître plus impressionnants, supputent des chercheurs de l'université de Cambridge (Royaume-Uni) après une dizaine d'années passées à les étudier. Les petits carnivores s'avancent ensuite lentement vers leur adversaire, et, dans 86 % des cas, cette dissuasion évite un affrontement direct. **A.-S. T.**

R. SUTCLIFFE, KALAHARI MEERKAT PROJECT

Queue levée, fourrure gonflée : les petits mammifères font face au clan adverse.

129 hertz

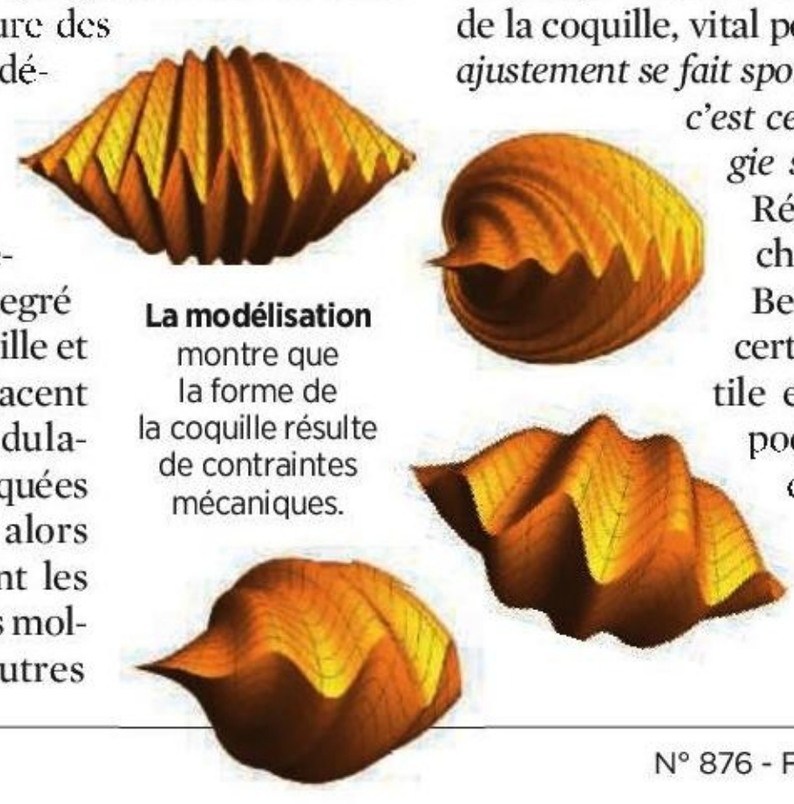
La résolution temporelle des yeux du faucon pèlerin

ORNITHOLOGIE **Alors que l'œil humain perçoit comme une lumière continue tout clignotement qui se produit à plus de 55 flashs par seconde, soit 55 Hz, cette valeur grimpe à 129 Hz chez le faucon pèlerin. Une faculté qui permet au rapace de foncer sur ses proies à quelque 350 km/h sans que sa vision ne se brouille. A.-S. T.**

La fermeture parfaite des bénitiers expliquée par la physique

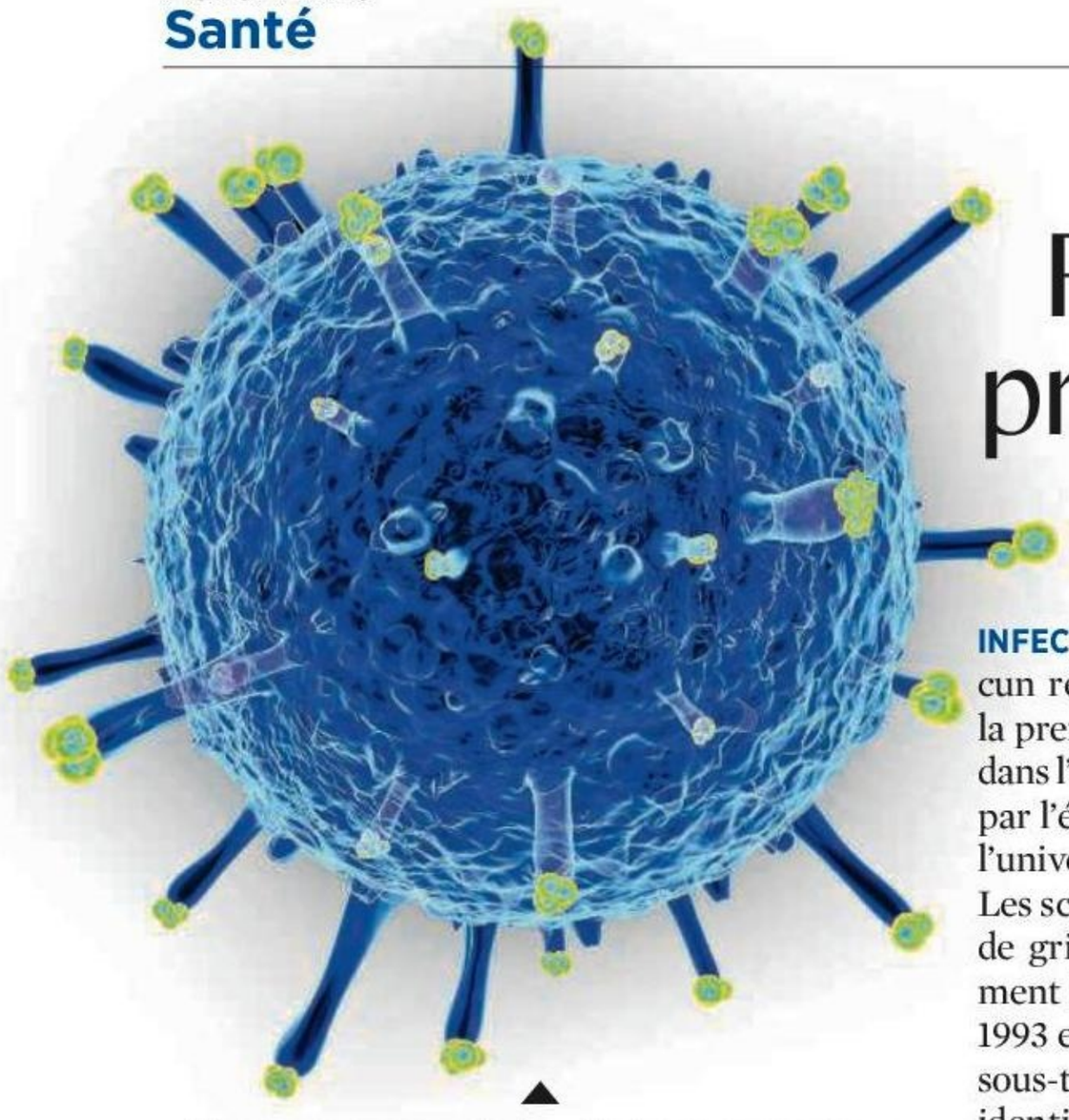
Des chercheurs ont modélisé les deux parties ondulées de la coquille du mollusque.

MALACOLOGIE Ce sont les lois physiques et pas seulement la génétique qui gouvernent la belle ondulation de la fermeture des bénitiers, révèle une modélisation mathématique faite par une équipe anglo-française. Quand les chercheurs ont simplement pris en compte le degré d'enroulement de la coquille et la rigidité du tissu sous-jacent qui la secrète, des ondulations plus ou moins marquées sont apparues. Ils ont alors pu reproduire fidèlement les formes biologiques de ces mollusques bivalves et d'autres organismes marins à coquille, les brachiopodes. De plus, l'emboîtement des deux parties ondulées de la coquille, vital pour l'animal, est parfait. « *Cet ajustement se fait spontanément car, physiquement, c'est ce qui requiert le moins d'énergie selon notre modèle* », précise Régis Chirat, l'un des auteurs, chercheur à l'université Claude-Bernard de Lyon. Comme chez certains céphalopodes tel le nautile et chez nombre de gastéropodes, la forme de la coquille des bénitiers résulte donc, de manière déterminante, de contraintes purement mécaniques au cours de son développement. **P. K.**



DEREK E. MOUTTON ET AL.

La modélisation montre que la forme de la coquille résulte de contraintes mécaniques.



Une personne exposée dans l'enfance au sous-type de virus H1N1 (ci-dessus, modélisation) sera moins sensible par la suite à cette forme de virus.

BSIP

Pour la grippe, c'est la première fois qui compte

Des chercheurs ont démontré le rôle clé de la première souche virale rencontrée dans l'enfance.

INFECTIOLOGIE La façon dont chacun réagit à la grippe dépendrait de la première souche virale rencontrée dans l'enfance, selon une étude menée par l'équipe de Michael Worobey, de l'université de l'Arizona (États-Unis). Les scientifiques ont analysé 9510 cas de grippe, recueillis par le département de la santé de l'Arizona, entre 1993 et 2015. Tous étaient dus à deux sous-types de virus (H1N1 et H3N2), identifiés à partir de deux antigènes de surface (hémagglutinine H et neuraminidase N).

De cette analyse se dégage un schéma clair : les personnes exposées d'abord à H1N1 durant l'enfance (par exemple à l'occasion des épidémies de 1918, 1957 ou 1977) ont été moins gravement malades lorsqu'elles ont été contaminées à nouveau par ce sous-type que celles ayant d'abord été infectées par H3N2 (apparu en 1968). Et *vice versa*. Ces résultats pourraient aider à prédire quel groupe d'âge présente le plus de risque de forme sévère de la maladie, en fonction de la souche virale en circulation. **E. S.**

20 %

La part de la population touchée par la toxocarose

PARASITOLOGIE C'est une maladie tropicale négligée mais loin d'être rare : un cinquième de la population mondiale serait affectée par le parasite de la toxocarose, révèle une analyse de 250 études de prévalence. Ce nématode est responsable d'un large éventail de symptômes neurologiques, allergiques ou cardiaques. L'Afrique serait la région la plus touchée avec 37,7 % de la population infestée. **H. R.** SOURCE : ALI ROSTAMI, BABOL UNIVERSITY OF MEDICAL SCIENCES, BABOL, IRAN.

Dormir contre les maladies cardiaques

CARDIOLOGIE Une prédisposition génétique aux maladies cardiaques peut être compensée par une bonne qualité de sommeil. C'est ce qui ressort d'une étude conduite sur 385 000 personnes durant huit ans. À l'inverse, les chercheurs montrent que les personnes avec un faible risque cardiovasculaire perdent le bénéfice de leur patrimoine génétique s'ils ont un mauvais score de sommeil. **H. J.**

SOURCE : MENGYU FAN, UNIVERSITÉ TULANE, ÉTATS-UNIS.

UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

Plus les émotions de la mère sont positives, plus le cerveau de l'enfant se montre réceptif.

Mère et bébé synchronisent leurs cerveaux

NEUROLOGIE Les cerveaux de la mère et de son bébé synchronisent leur activité cérébrale lorsqu'ils interagissent, selon des psychologues de l'université de Cambridge (Royaume-Uni). Ceux-ci ont mené une étude sur 15 femmes et leurs enfants âgés de 10 mois en moyenne, équipés de casques d'électroencéphalographie (EEG). Plus la mère exprime d'émotions positives, et plus les ondes synchronisées sont intenses. Ce qui selon les scientifiques, serait favorable à l'apprentissage. L'étude n'a pas été menée sur les pères **E. S.**

HYPOTHÈSE

L'essence au plomb favoriserait la démence

NEUROLOGIE Depuis quelques années, les autorités médicales américaines et européennes observent une baisse du nombre de cas de démence. Une équipe de l'université de Toronto (Canada) avance une explication : la moindre exposition des populations aux émanations de carburant plombé, 15 fois moins importantes aujourd'hui que quatre décennies plus tôt. **H. R.**

Un plastique antibactérien

PROPHYLAXIE Inspirés par la feuille de lotus hydrofuge, des scientifiques de la McMaster University, à Hamilton (Canada) ont mis au point un film plastique qui repousse les bactéries et empêche leur croissance.
Ce matériau comporte des microrides recouvertes de nanoparticules qui excluent physiquement toutes les molécules externes. **C. G.**

MACMASTER UNIVERSITY

Le matériau repousse les micro-organismes.

36,5 °C

La température normale du corps humain

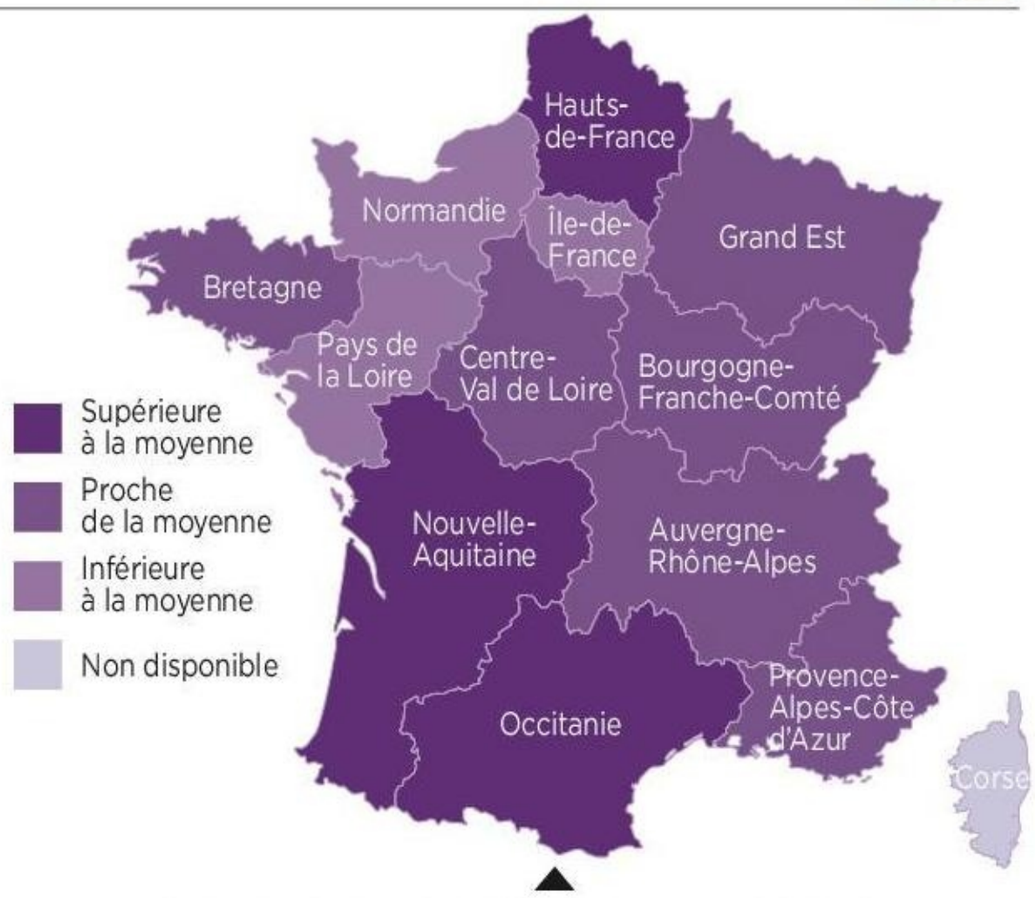
PHYSIOLOGIE Depuis le XIXe siècle, la température corporelle aurait baissé de 0,03 °C par décennie et serait maintenant inférieure aux 37 °C tenus pour normaux en l'absence de fièvre. Cela serait dû à une diminution des inflammations liée notamment à une meilleure hygiène et au recul des maladies infectieuses. **C. L.**

SOURCE : MYROSLAVA PROTSIV, UNIVERSITÉ STANFORD, ÉTATS-UNIS.

Les Français boivent toujours trop d'alcool

ADDICTOLOGIE **La consommation d'alcool reste élevée en France, annonce Santé publique France. Notre pays est au 6e rang des 34 membres de l'OCDE, avec d'importantes disparités selon les territoires. C'est en Occitanie que la consommation quotidienne est la plus répandue (12,6 % des habitants). L'étude souligne également que 2 % des passages aux urgences sont dus à l'alcoolisation.** **H. R.**

BRUNO BOURGEOIS



Selon les régions, 7,1 à 12,6 % des adultes de 18 à 75 ans consomment tous les jours de l'alcool, en France métropolitaine.

Un astronaute traité dans l'espace pour un caillot sanguin

L'impesanteur à bord de l'ISS serait un facteur de risque.

MÉDECINE SPATIALE C'est un cas médical inédit qui vient d'être rapporté par le *New England Journal of Medicine*. Alors qu'il réalisait une échographie de son cou dans le cadre d'une étude menée à bord de la Station spatiale internationale (ISS), un astronaute (dont l'identité n'a pas été révélée) s'est vu diagnostiquer un caillot sanguin dans une veine jugulaire. Le risque principal ? Que le caillot se détache et provoque une embolie pulmonaire, potentiellement mortelle. Plutôt qu'un retour sur Terre, risqué en l'état, un spécialiste a préconisé d'utiliser des anticoagulants disponibles à bord de l'ISS pour tenter de dissoudre le caillot. Problème : il s'agit d'un traitement au long cours et les stocks sont limités. Au bout de 33 jours d'injections quotidiennes, la dose utile a été rationnée en attendant le réapprovisionnement de l'ISS.

NASA

L'absence de pesanteur qui règne dans l'espace accroîtrait le risque de thrombose veineuse.

Le traitement a duré ainsi plus de trois mois, sous étroite surveillance, sans que le caillot ne soit entièrement résorbé. Ce n'est que dix jours après son retour sur Terre que l'astronaute a vu sa thrombose se résoudre spontanément. Conclusion de la mésaventure : l'impesanteur à bord de l'ISS serait un facteur de risque qui demande à être mieux étudié. **H. J.**

EN DEUX MOTS

MUSIQUE. D'après des médecins allemands, les batteurs professionnels auraient les hémisphères cérébraux mieux connectés que ceux de la population générale. **MALBOUFFE.** L'étude française Nutrinet suggère que la consommation d'aliments industriels « ultratransformés » pourrait augmenter le risque de diabète de type 2. **IMMUNITÉ.** L'infection par le virus Zika conférerait une immunité temporaire contre la dengue, selon l'université de Floride (États-Unis).

CES 2020

Cinq technologies inédites

Sélection des innovations les plus marquantes du grand salon de l'électronique, le Consumer Electronic Show, qui s'est tenu à Las Vegas en janvier.

Une lampe pour les dyslexiques

PERCEPTION Une entreprise bretonne, Lexilife, a présenté une lampe qui pourrait changer la vie des dyslexiques. Ces personnes (10 % de la population mondiale) ont des difficultés à lire en raison de leur cerveau qui traite de manière asymétrique les informations provenant de chacun des deux yeux, faisant apparaître deux images au lieu d'une. *« Lexilight diffuse une lumière pulsée qui efface cet effet miroir,* explique le fondateur de la PME, Jean-Baptiste Fontes. *Testée sur 300 personnes, notre lampe a amélioré le ressenti de confort de lecture chez 87 % d'entre elles. »* Une molette règle la fréquence de la pulsation pour adapter la lumière à chaque personne. Ce produit, qui vient d'être commercialisé, est d'abord destiné aux enfants, *« pour leur éviter un décrochage scolaire fréquent chez les dyslexiques »,* détaille Jean-Baptiste Fontes. **H. R.**

LEXILIFE

Ballie, l'assistant domotique mobile

ROBOTIQUE Conçu par le coréen Samsung, cet étrange robot aux allures de balle de tennis est capable de suivre une personne à l'aide de sa caméra. C'est en fait un assistant connecté, équipé d'une application mobile embarquée et d'une intelligence artificielle, répondant à des commandes telles qu'allumer la télévision, ouvrir les stores ou mettre en route l'aspirateur Roomba. **A. D.**

AFP

Le smartphone explique les observations du télescope

ASTRONOMIE Le spécialiste américain des télescopes Celestron a dévoilé un modèle, le StarSense Explorer, qui fonctionne en duo avec un smartphone : une application de reconnaissance d'image sur celui-ci permet de localiser la région du ciel observée. On peut même sélectionner n'importe quel astre sur l'écran pour obtenir des informations complémentaires. **M. N.**

CELESTON

SEGWAY

Le gyropode dans un fauteuil

TRANSPORTS Le fabricant américain de gyropodes Segway a décliné son produit en une version… avec fauteuil. Le S-Pod se pilote avec un joystick et serait capable d'atteindre 38 km/h. Et pour le design, Segway raconte s'être inspiré des « gyrosphères » de Jurassic World. **M. N.**

Vision-S, la voiture du futur façon Sony

AUTOMOBILE Le groupe japonais Sony, de l'électronique grand public, se mue en constructeur automobile. Fabriqué pour le CES mais opérationnel, ce concept car est bardé d'écrans, dont un tableau de bord occupant toute la largeur de l'habitacle. Ils donnent accès aux réglages du véhicule, à de la musique, à des jeux et à des films, avec des haut-parleurs séparés pour chaque passager. La Vision-S est aussi équipée d'une dizaine de caméras en lieu et place des rétroviseurs, de lidars, de radars et d'ultrasons. **A. D.**

SONY

FACEBOOK ARTIFICIEL INTELLIGENCE

Le visage sur la vidéo originale a été remplacé par celui de la personne à droite avec une technique basée sur l'IA.

Facebook à l'assaut des « deepfakes »

NUMÉRIQUE Démuni face aux *deepfakes*, ces vidéos hyperréalistes truquées par intelligence artificielle, le réseau social américain lance le Deepfake Detection Challenge : un concours qui s'adresse aux chercheurs pour concevoir une technologie capable de les détecter. Une première. Les équipes de Facebook n'y participent pas directement, mais elles ont créé 100 000 vidéos authentiques ou manipulées destinées à entraîner et tester les outils proposés. **A. D.**

IL A DIT

« À cause d'une anomalie, le véhicule avait une heure différente de l'heure réelle »

Jim Bridenstine, administrateur de la Nasa, expliquant l'échec de la première tentative d'arrimage à la Station spatiale internationale de la nouvelle capsule spatiale de Boeing, Starliner, censée transporter des astronautes dès 2020.

Les câbles Internet détectent les séismes

PRÉVENTION DES RISQUES Le 1,2 million de kilomètres de câbles sous-marins servant à Internet pourra aussi détecter la houle ou des séismes. Le principe de ces « géophones » : les fibres optiques ont des impuretés qui renvoient vers l'émetteur une partie de la lumière acheminée et cela forme un signal périodique. Si la fibre se trouve dilatée ou contractée à cause d'une vibration, la périodicité de ce signal change. **A. Kh.**

SOURCE : A. SLADEN, UNIVERSITÉ DE LA CÔTE D'AZUR, VALBONNE.

SHUTTERSTOCK

Les fibres optiques des câbles sont sensibles aux ondes sismiques.

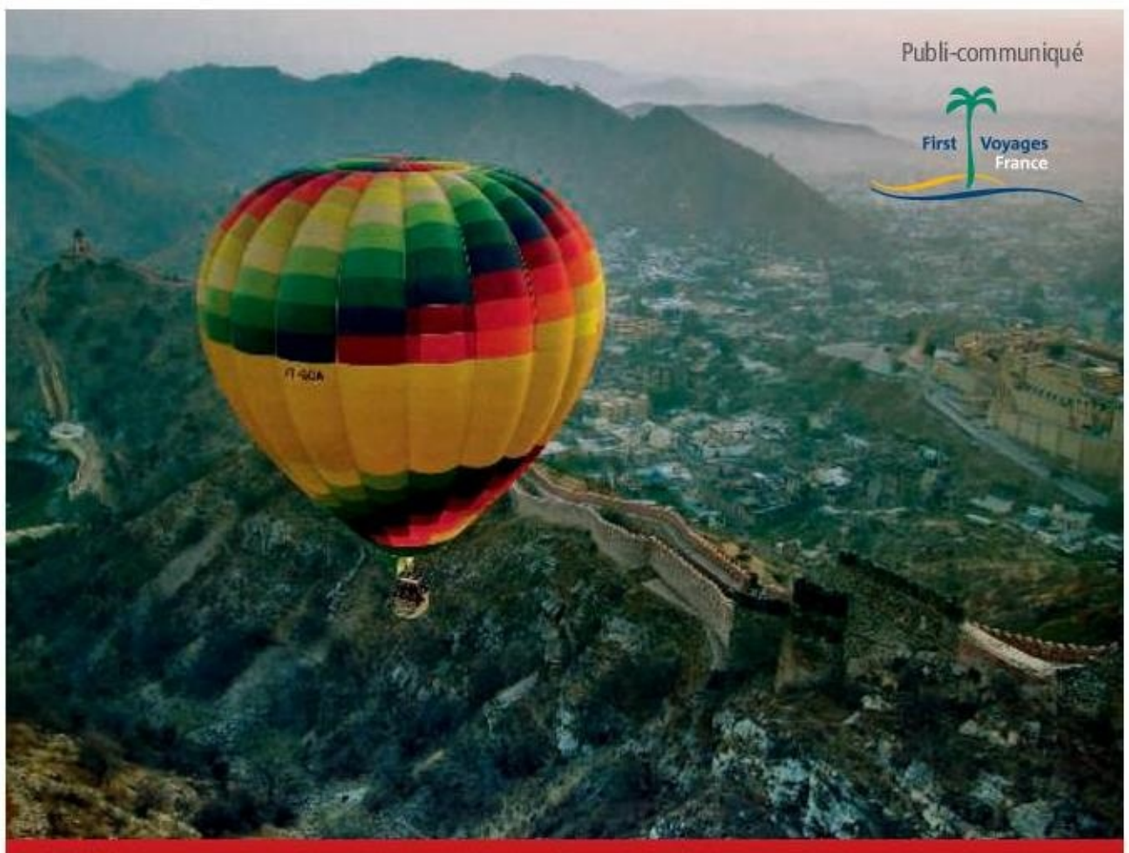
La 10e symphonie de Beethoven sera achevée par une IA

MUSICOLOGIE D'une 10e symphonie de Ludwig van Beethoven (1770-1827), il n'existe que quelques fragments du premier mouvement en mi-bémol majeur. Tout le reste est à écrire. Deutsche Telekom, basée à Bonn (Allemagne), la ville natale du compositeur, a rassemblé une équipe de chercheurs en intelligence artificielle (IA), de musicologues et de spécialistes du compositeur. L'idée : faire écrire la symphonie en partie par un algorithme. Les chercheurs ont commencé par constituer une base d'entraînement à partir de toutes les œuvres de Beethoven. L'algorithme s'en sert pour prolonger de quelques notes les fragments existant de la 10e. Le résultat final sera interprété en public le 28 avril par le Beethoven Orchester Bonn. **A. D.**

TELEKOM

L'équipe est constituée de chercheurs en IA et de musicologues.

Publi-communiqué



FVF des voyages haut de gamme à prix réduits

Besoin de vacances?
Découvrir les trésors du monde, faire des rencontres fascinantes, le tout à prix vraiment avantageux. Voilà 10 ans que FVF permet à des milliers de voyageurs d'en profiter !

Contactez FVF dès maintenant au:

03 68 78 00 39

du lundi au vendredi : 9 h 00 – 18 h 00, samedi : 9 h 00 – 14 h 00

et réservez votre fabuleux voyage au plus vite !
www.first-voyages.fr

Challenges

Notre charte*

« Challenges *est un hebdomadaire économique non partisan et indépendant. L'adhésion à l'économie sociale de marché, la défense d'une économie ouverte, humaniste et de progrès, sont constitutives de notre identité, de notre ligne éditoriale, respectant le pluralisme. Les faits sont présentés aux lecteurs avec la plus grande rigueur. Toute information doit être recoupée et vérifiée plusieurs fois, les rumeurs bannies. Ne sont publiées que les informations dont l'origine est connue et fiable. Les enquêtes, d'une part, les chroniques et éditoriaux, d'autre part, sont clairement séparés. Les journalistes respectent toujours la présomption d'innocence, ainsi que la vie privée des personnes.* »

* Signée par la société des journalistes et l'actionnaire. 26 septembre 2013

L'économie de demain est l'affaire de tous

188 479 exemplaires OJD

4 275 000 lecteurs

Mal de dos pourquoi il faut bouger

Un virage à 180° ! Plutôt que de rester au lit, il est conseillé aux lombalgiques d'être actifs, l'exercice étant désormais le traitement n° 1. Si les bénéfices du mouvement sont prouvés depuis plus de vingt ans, médecins et malades commencent seulement à en prendre conscience. Retour sur des années d'errance et sur les vraies causes de cette affection.

Dossier réalisé par
Cécile Coumau et
Sylvie Riou-Milliot

« Mal de dos : *le traitement, c'est le mouvement.* » Pour les millions de personnes atteintes de douleurs dorsales, qui pensent que le meilleur des remèdes est de rester allongé, la nouvelle campagne de l'Assurance-maladie a marqué un tournant. La Sécurité sociale déploie en effet les grands moyens depuis deux ans — affiches, spots télé et radio, campagnes sur les réseaux sociaux... — pour convaincre patients mais aussi médecins de tout changer dans le traitement de ces affections. Non seulement, il ne faut plus rester au lit mais il faut... bouger ! Si l'Assurance-maladie martèle ce message, c'est qu'une étude a révélé que le nombre d'arrêts de travail liés au mal de dos a bondi de 13 à 19 % entre 2005 et 2015, les médecins généralistes les prescrivant encore en première intention dans 65 % des cas en 2017. Et que 7 Français sur 10 pensent encore que le repos est la meilleure solution. Or, depuis plus de vingt ans, les arguments scientifiques sont là pour montrer que l'immobilité n'est pas le bon traitement.

Le terme « mal de dos » employé par la Sécurité sociale fait essentiellement référence à la lombalgie, cette douleur située *« entre la charnière thoraco-lombaire et le pli fessier intérieur »*, comme le définit la Haute Autorité de santé (HAS) Mais le mal de dos peut aussi siéger au niveau des cervicales (cervicalgie, 30 % des cas) ou plus rarement au milieu du dos (dorsalgie). Dans tous les cas, l'immobilisation la plus courte est le mot d'ordre. Et

SRL/BSIP

24
vertèbres
La colonne vertébrale se compose de trois familles de vertèbres (du haut vers le bas) :

- **7** cervicales
- **12** dorsales
- **5** lombaires

Lombalgie

Douleur située dans le bas du dos, entre la cage thoracique et le pli fessier inférieur.

Lumbago

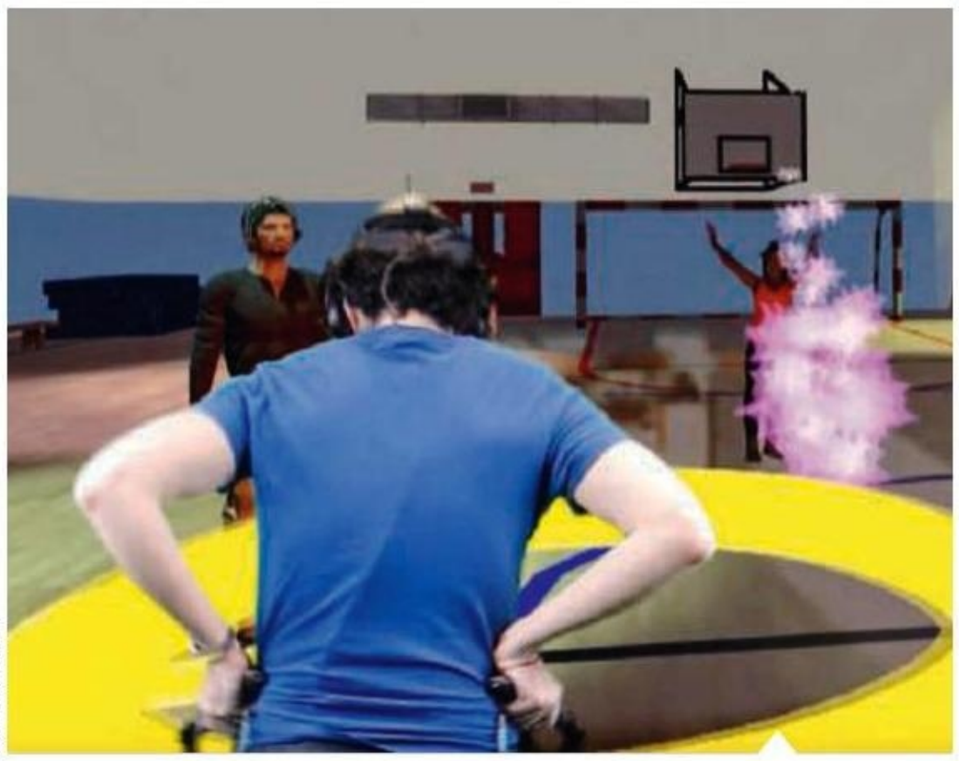
Lombalgie aiguë qui survient le plus souvent suite à une rotation excessive. Il se manifeste par une douleur brutale, un blocage.

Sciatique

Douleur du membre inférieur située sur le trajet du nerf sciatique, du dos jusqu'au pied. Elle est souvent associée à des lombalgies, on parle alors de lombosciatique. Sa cause principale est la hernie discale.

80 %
de la population aura au moins une fois dans sa vie mal au dos.

de nombreux pays l'ont compris depuis longtemps, telle l'Australie où des campagnes de communication conseillent aux lombalgiques de faire de l'exercice et de rester au travail depuis 1997. « *Les premières études remontent au milieu des années 1980* », indique le Dr Florian Bailly, rhumatologue, médecin de la douleur à Paris, et coauteur des recommandations de la HAS qui indiquaient dès 2000 que l'activité physique était le meilleur traitement.


KINEQUANTUM

La réalité virtuelle peut être utilisée en kinésithérapie pour permettre au patient de réaliser des mouvements du dos en toute autonomie (ici des exercices de hula hoop).

Des séances de kinésithérapie peuvent aider à soulager la douleur quand celle-ci devient chronique et à adopter les bonnes postures.

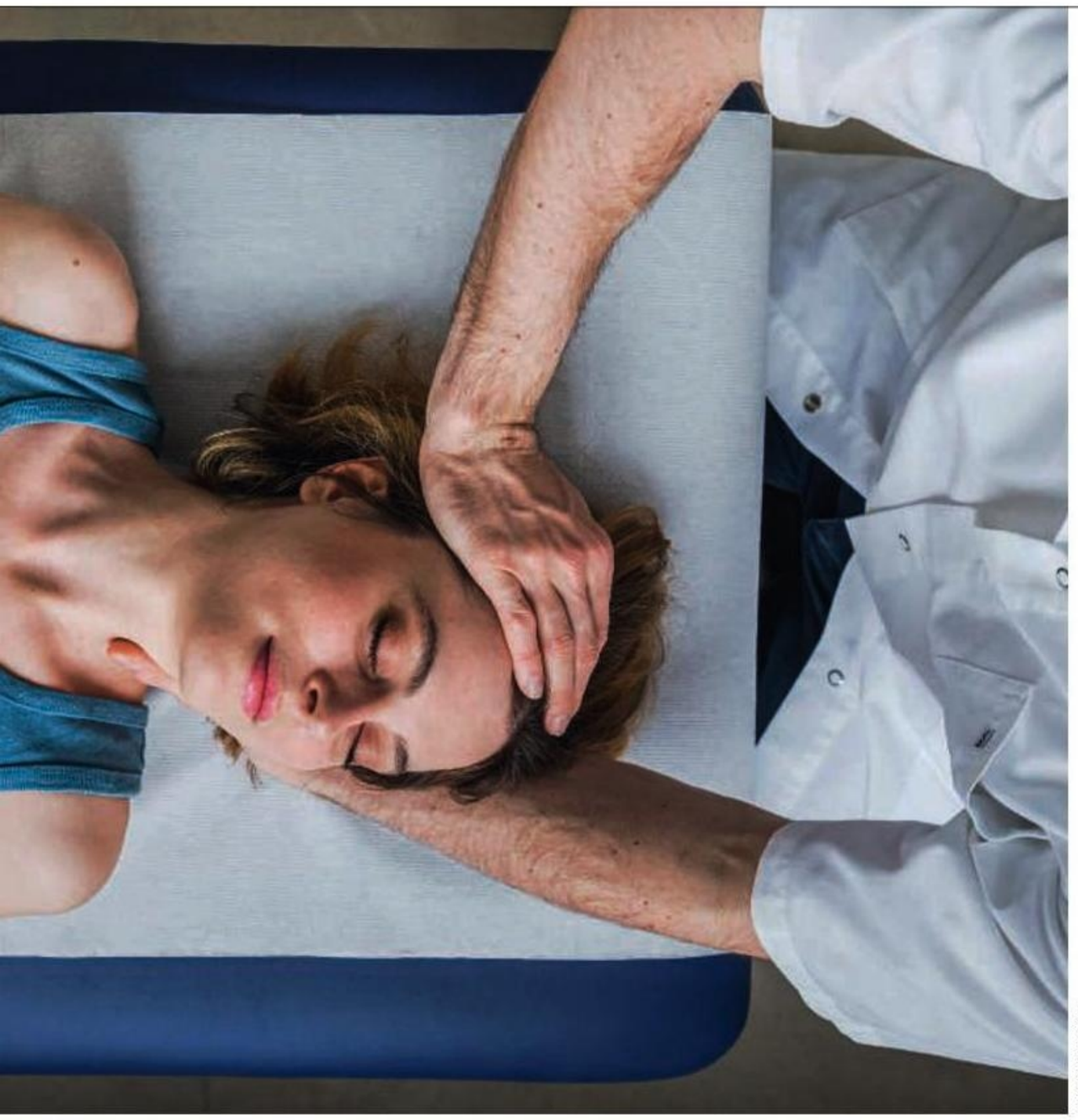
Un programme de rééducation active

Le virage à 180° a été pris progressivement. Face à l'inefficacité sur le long terme des traitements conventionnels fondés sur le repos et les massages, des études les comparant à d'autres techniques ont été conduites. « *L'un des pionniers, le médecin américain Tom Mayer, a développé un programme de restauration fonctionnelle du rachis* [colonne vertébrale] *fondé sur le réentraînement à l'effort* », explique Alexandra Roren, kinésithérapeute à l'hôpital Cochin à Paris. Dès 1984, il démontre que 85 à 90 % des patients ayant bénéficié d'une rééducation active pendant un mois reprenaient leur activité professionnelle alors que la majorité d'entre eux était en arrêt de travail depuis des semaines, voire des années. L'autre grande avancée est venue des neurosciences appliquées à la douleur. « *Nous avons longtemps pensé qu'une lésion était forcément à l'origine d'une douleur*, explique Éric Bouthier, kinésithérapeute à Lyon et créateur du site Comprendre son dos. *Or, vers la fin des années 1990, nous avons découvert que cette corrélation était fausse.* » Les facteurs mécaniques et anatomiques habituellement désignés comme la cause de la douleur (hernie discale, faible musculature, posture...) ne sont ni suffisants ni nécessaires à son apparition. Ils ne sont qu'une pièce d'un grand puzzle. Les muscles, les tendons, les ligaments, peuvent aussi être sensibilisés, à la suite d'un effort inhabituel ou lors de périodes de plus grande vulnérabilité dues par exemple au manque de sommeil ou au stress. Dans les cervicalgies, le mythe de la posture a aussi été brisé. Et notamment grâce à une large étude parue en 2018 dans l'*European Spine Journal* qui n'établissait aucun lien entre postures et douleurs dans le cou. « *Cela nous a conduits à abandonner le modèle biomédical pour adopter le modèle dit biopsychosocial qui est beaucoup plus complexe* », précise Éric Bouthier. Dans ce modèle, le « vécu » du patient et le retentissement de sa douleur sont analysés d'un point de vue physique, psychologique et socio-professionnel. C'est pourquoi, même si le mal de dos n'est pas une maladie grave, il est nécessaire de consulter un ou plusieurs professionnels pour démêler ces liens, ce qui peut nécessiter l'intervention d'un kiné, d'un spécialiste de la douleur, d'un médecin du travail ou encore d'un psychologue... « *Des séances de thérapie cognitivo-com-*

ÉVOLUTION

Une colonne vertébrale malmenée par la bipédie

Pourquoi les humains souffrent-ils davantage de la colonne vertébrale que les primates non humains ? Certains anthropologues suggèrent que la responsable de cette injustice serait... la bipédie ! Notre dos ne serait pas « équipé » pour supporter le poids et le stress exercés sur les vertèbres lorsque nous sommes en position debout. *« Notre corps était adapté à une position horizontale par rapport au sol et nous l'avons redressé voilà environ 7 millions d'années*, explique l'anthropologue américain Bruce Latimer dans la revue *Science*. *Nous avons donc dû changer presque tous les os du corps* [pieds, genoux, hanches...]. *Par conséquent, les humains souffrent de maux qui n'affectent aucun autre animal. »* En 2015, des spécialistes de l'évolution ont même constaté que les personnes souffrant d'une hernie discale avaient des vertèbres... plus proches de celles des chimpanzés que celles des humains ! Dans la revue *BMC Evolutionary Biology*, ils en concluent que ceux-ci seraient donc encore moins armés que les autres pour la bipédie. C. Co.



VOISIN/PHANIE

portementale peuvent en effet aider les malades à prendre conscience de certaines pensées négatives, mais aussi de certains gestes inappropriés », indique Florian Bailly. Réaliser que l'on contracte ses muscles dès que l'on s'assoit et que cela ne sert à rien, voire accentue la douleur, peut en effet aider à modifier son comportement.

Renforcer les muscles du dos pour éviter la douleur

Pourtant, en raison justement de la douleur ressentie, les patients rechignent à bouger, entraînant progressivement un déconditionnement à l'effort et une « fonte musculaire ». « *Or les muscles du dos, chargés de lutter contre les effets de la gravité, fondent particulièrement vite*, explique Alexandra Roren. *Lorsqu'ils deviennent moins forts que les abdominaux, la stabilité du rachis est fragilisée, ce qui provoque des douleurs.* » C'est pourquoi la kinésithérapeute conseille avant tout de lutter contre les idées reçues en faisant travailler ses muscles spinaux — muscles profonds du dos, acteurs essentiels de la posture —, même si cela peut sembler contre-intuitif. « *L'idée selon laquelle la douleur fonctionne comme un système d'alarme est exacte mais plus une douleur devient persistante, plus elle est liée à la sensibilité du système nerveux et moins le système d'alarme est fiable*, explique Éric Bouthier. *Peu à peu, le système nerveux devient trop protecteur et l'alarme se déclenche à un seuil plus bas.* » Ce qui incite à rester sous la couette ! Une étude menée en 2012 à l'université du Québec (Canada) a montré que les patients qui ont mal au dos modifient leur façon de bouger. « *Les mouvements sont moins souples, moins adaptés à l'environnement, ce qui peut favoriser le passage à un stade chronique* », explique Yves Henchoz, responsable de recherche à Unisanté, centre de médecine générale et santé

THÉRAPEUTIQUE

Des antidouleurs à l'efficacité très limitée

« *Aucun médicament antalgique n'a prouvé une efficacité à moyen terme sur l'évolution d'une poussée aiguë de lombalgie.* » Le constat de la Haute Autorité de santé (HAS) dans ses recommandations publiées en 2019 est sans appel. Et l'organisme enfonce le clou en précisant que les antidouleurs n'ont qu'une action très temporaire, de l'ordre de 4 à 12 heures « *En cas de douleur aiguë, les anti-inflammatoires sont tout de même considérés comme les plus efficaces mais pour la plus courte durée possible et à la dose efficace la plus faible* », insiste le Dr Florian Bailly, qui a coordonné les recommandations. Les opioïdes peuvent être prescrits, mais uniquement en cas d'échec de traitement, même s'ils font à peine mieux qu'un placebo tout en présentant un fort risque de dépendance. En revanche, le paracétamol, qui a longtemps été l'antidouleur de référence contre le lumbago, n'a plus sa place dans l'arsenal thérapeutique ! Il n'est en effet pas plus efficace qu'un placebo selon une étude australienne parue dans T*he Lancet* (2014). Quant aux décontractants musculaires, « *les seuls qui restent sur le marché sont anciens et de faible efficacité* », poursuit Florian Bailly. Plusieurs ont d'ailleurs été retirés du marché, comme le Décontractyl en juin 2019, en raison de leurs nombreux effets secondaires (somnolence, nausées, éruptions cutanées, chocs anaphylactiques, dépendance...). Enfin, les infiltrations d'anti-inflammatoires dans le rachis et la chirurgie ne sont d'aucun secours pour soulager les lombalgies. Ces actes sont réservés aux patients souffrant d'une sciatique sévère et résistante au traitement médicamenteux. **C. Co.**

SHUTTERSTOCK

Les anti-anflammatoires sont les plus efficaces en cas de douleur aiguë, le paracétamol n'ayant, lui, aucune efficacité, selon une étude.

publique à Lausanne (Suisse). Par ailleurs, l'arrêt temporaire de l'activité physique peut soulager mais seulement temporairement. *« Le cerveau raisonne à court terme,* indique Florian Bailly. *Du coup, nous sommes confortés, à tort, dans l'idée que le repos soulage.* »

Pourtant, certains médecins ont bien du mal à évoluer sur cette question. Tout d'abord parce qu'ils n'ont pas été formés à ces notions physiopathologiques. *« J'ai 35 ans et on ne m'a jamais enseigné qu'une douleur sans lésion était possible »,* témoigne Florian Bailly. En outre, une lombalgie dont l'origine, mécanique, est visible à la radio ou à l'IRM conforte médecin et malade. Pourtant, *« les patients qui passent une IRM ont souvent plus de douleur et une moins bonne évolution de leur pathologie »,* poursuit le spécialiste. Car constater, sur les clichés, que les disques sont abîmés renforce en effet l'idée reçue selon laquelle le dos est fragile et qu'il faut adopter des postures protectrices. *« Or nous savons aujourd'hui que ces notions sont totalement fausses »,* affirme Alexandra Roren. *« Il est normal de constater des anomalies telles que des disques abîmés chez un grand nombre de personnes à partir de 40 ans et ne pouvons en aucun cas affirmer que les douleurs y sont liées,* ajoute Florian Bailly. *Ces clichés ne font qu'inquiéter le patient.* » Raison pour laquelle la réalisation d'une IRM ou d'un scanner est recommandée uniquement si la douleur dure plus de trois mois, en cas de suspicion de sciatique et dans la perspective d'une infiltration.

FLORIAN BAILLY

« Le cerveau raisonne à court terme. Du coup, nous sommes confortés, à tort, dans l'idée que le repos soulage »

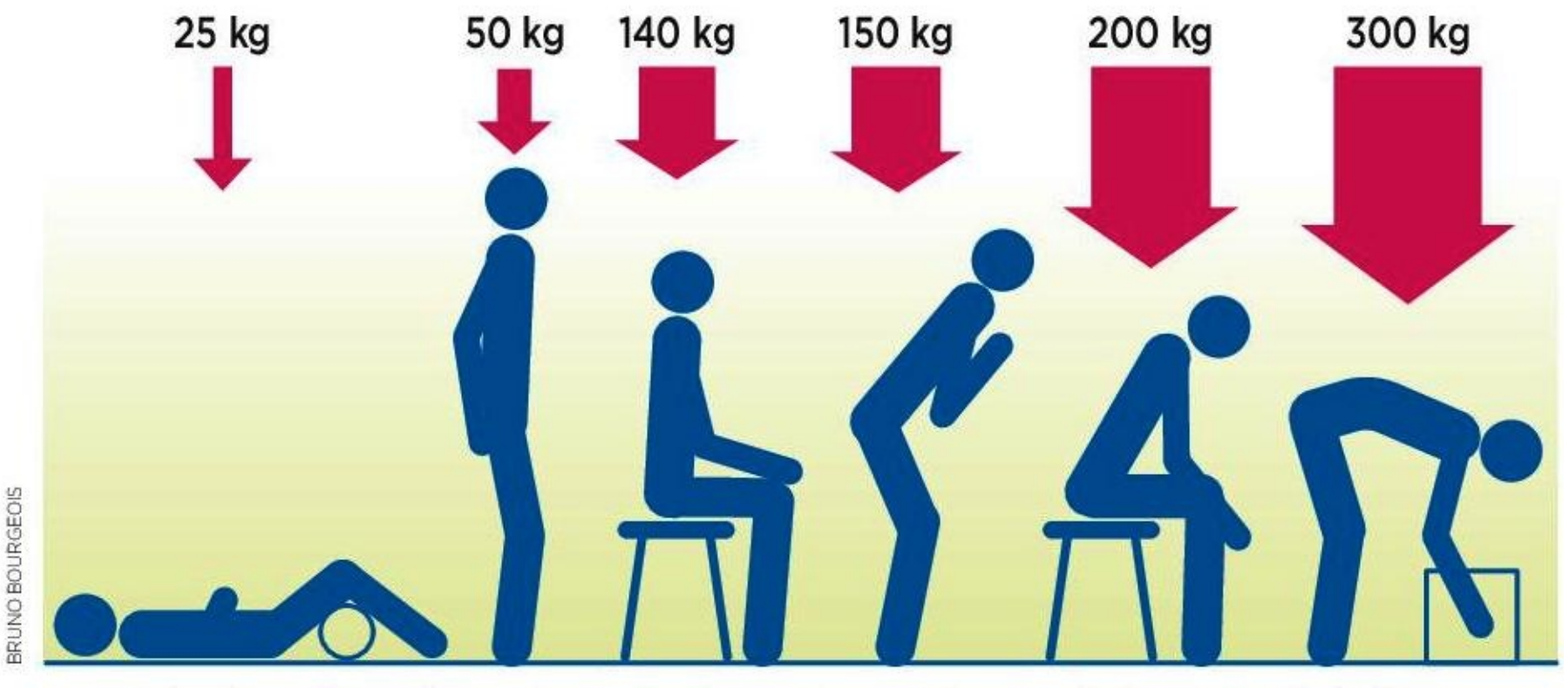
Florian Bailly, rhumatologue, médecin de la douleur à Paris et coauteur des recommandations de la Haute Autorité de santé

Aux médecins de délivrer un message rassurant

Pourtant, si le message martelé par l'Assurance-maladie est clair, il n'est pas facile à appliquer. Car que veut dire exactement « bouger » ? Pas question, évidemment, de pratiquer un sport intensément. Ce n'est que graduellement que le patient atteint de mal dos chronique doit reprendre l'activité physique. *« Le traitement est un peu identique à celui de la phobie,* explique Éric Bouthier. *Il faut se confronter peu à peu à ce qui pose problème, en l'occurrence le mouvement.* » Une démarche qui permet aux patients de tolérer progressivement la pratique de nombreuses activités, parfois plus qu'ils ne l'auraient imaginé. Mais, plus simplement, bouger veut également dire... se lever de son lit, canapé ou chaise pendant cinq minutes toutes les heures ! Quant aux séances de rééducation, elles ne sont pertinentes que si la douleur est chronique ou risque de le devenir, le patient devant toujours rester actif même chez le kinésithérapeute. *« Certains peuvent avoir envie de séances de massage mais, seules, elles n'auront aucun effet sur le long terme »,* indique Florian Bailly.

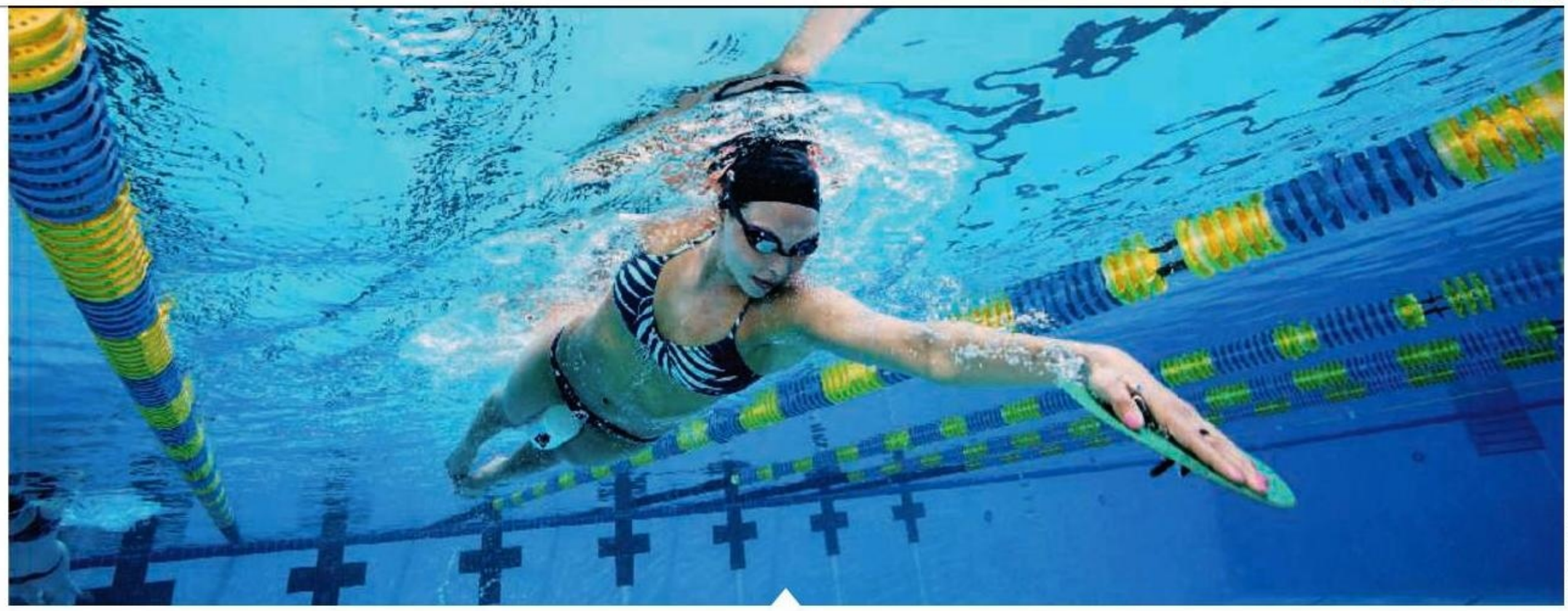
La lombalgie se soigne aussi par les mots. La HAS recommande fortement aux médecins *« de délivrer une information rassurante quant au pronostic de la lombalgie commune »,* car seules 6 à 8 % des cas deviennent chroniques et 90 % des patients guérissent en moins de quatre à six semaines. En 2006, une étude française a montré que la distribution par le médecin généraliste du *Guide du dos,* la version française du *Back Book* américain qui contient des conseils simples et rassurants sur la lombalgie aiguë, réduisait de 25 % le nombre de patients souffrant d'une douleur persistante trois mois après. Bien sûr, il ne suffit pas de bouger et d'être optimiste pour en finir avec le mal de dos. Agir sur les facteurs physiques, psychologique et socio-professionnel n'est pas une garantie de guérison à 100 %. *« Ce que nous pouvons promettre, c'est de remettre la douleur à sa juste place pour qu'elle n'envahisse pas toute la vie »,* assure Alexandra Roren. C'est déjà beaucoup. ■

C. Co.



BRUNO BOURGEOIS

Selon les positions, la pression sur les disques intervertébraux varie beaucoup. Elle équivaut à celle exercée par une masse de 25 kg en position allongée — celle qui repose le mieux les disques — jusqu'à 300 kg lorsque l'on soulève une charge sans fléchir les jambes.



PLAINPICTURE

Nager avec des palmes de main sollicite intensément le rachis dorso-lombaire et peut entraîner douleurs et contractures.

Du sport, mais sans excès

Pratiquer une activité physique ne s'improvise pas. Voici quelques règles pour éviter les effets secondaires.

SI LE MOUVEMENT est désormais le traitement n° 1 de la lombalgie avec ou sans sciatique, comme l'affirme l'Assurance-maladie, encore faut-il savoir quels exercices privilégier. Car si les études prouvent que l'activité physique agit comme un médicament *(lire p. 30)*, elle peut, en cas de mauvaises pratiques, présenter des effets secondaires. *« Tout d'abord, il ne faut pas tenter un exercice trop exigeant en phase aiguë de lumbago ou de sciatique. L'activité doit bien sûr être tolérable »*, précise Alexandra Roren, kinésithérapeute à l'hôpital Cochin à Paris. Avant la reprise de toute activité physique, une personne sujette au mal de dos devrait commencer par un programme de renforcement musculaire. *« Mais dans la très grande majorité des cas, on n'abîme pas son dos en faisant du sport »*, insiste Alexandra Roren. Aucun sport n'est donc déconseillé, à condition d'être pratiqué à doses raisonnables. *« Cela doit rester avant tout un plaisir car les effets positifs de l'activité physique sur le dos ne sont perceptibles qu'à moyen terme. Il faut donc tenir la distance et ne pas s'inquiéter en cas de douleur au début »*, indique Éric Bouthier, kinésithérapeute à Lyon.

Par ailleurs, inutile de choisir en priorité une activité réputée pour son travail dorsal. Ainsi, la natation n'est pas la panacée si ceux qui la pratiquent ne possèdent pas les bases techniques, comme l'a montré une étude de médecins bordelais. Certains mouvements sollicitent en effet beaucoup le rachis dorso-lombaire, notamment la brasse, et peuvent provoquer des douleurs. Quant aux nageurs débutants, ils risquent de souffrir de contractures musculaires s'ils adoptent les palmes de main, puisque la surface de propulsion augmente.

Il faut également pratiquer sans excès les sports pourtant réputés « doux » comme le yoga. Une étude publiée dans l'*Orthopedic Journal of Sports Medicine* (2016) a en effet montré que le taux de blessures apparues au cours de cette pratique a été multiplié par huit entre 2001 et 2014 chez les personnes de 65 ans et plus, les blessures les plus courantes affectant le dos. Selon les auteurs, *« les problèmes surviennent souvent parce que les personnes veulent aller aussi vite et aussi loin que possible, par exemple lors d'une torsion vertébrale ». « Or, il faut d'abord utiliser ses muscles afin de créer une base solide pour le mouvement. »* Vélo, marche, tennis, course à pied... tout est possible, à petites doses. ■ **C. Co.**

APPLI POUR SMARTPHONE

Les bons exercices au bout des doigts

Recevoir un SMS personnalisé de son « coach dos » sur son téléphone, c'est possible avec l'application Activ'dos lancée par l'Assurance-maladie en 2017. Plus de 60 exercices, à réaliser chez soi ou au travail, sont proposés. Sans oublier des quiz et des vidéos sur les postures à adopter. La version, enrichie en 2018, géolocalise les équipements sportifs autour de chez soi (piscines, gymnases...) et crée une séance personnalisée avec bande sonore pour mieux suivre sa progression. L'appli est disponible gratuitement pour les smartphones sous iOS ou Android. **S. R.-M.**

Quatre pistes de recherche pour réparer le disque intervertébral

Parmi les essais les plus prometteurs : la thérapie cellulaire utilisant la moelle osseuse d'un donneur, la stimulation du cerveau pour réduire les douleurs lombalgiques, l'application d'un courant électrique sur les racines nerveuses.

AGIR SUR LE DISQUE INTERVERTÉBRAL pour le restructurer et, un jour peut-être, parvenir à le régénérer, recourir à l'électricité pour stimuler le cerveau ou soulager les nerfs irrités, ou encore prédire les patients qui vont développer un mal de dos chronique, tels sont axes de la recherche actuelle.

1 Des cellules souches pour régénérer le disque

La thérapie cellulaire, ou greffe de moelle osseuse, pourrait-elle soulager les personnes souffrant de lombalgies ? L'essai clinique européen ReSpine — commencé en 2019 et coordonné par le Pr Christian Jorgensen, directeur de l'Institut de médecine régénératrice et de biothérapie (IRMB) du CHU de Montpellier — devrait apporter la réponse. Il est fondé sur une injection unique, au sein même du disque intravertébral du patient, de cellules souches mésenchymateuses (CSM) provenant de dons de moelle osseuse. Ces CSM sont à même de produire des cellules appartenant au tissu squelettique comme les os et le cartilage, avec l'espoir de restructurer ainsi le disque intervertébral. 112 patients dont plus de 40 Français font l'objet d'un suivi dans neuf centres européens (quatre en France, trois en Espagne, un en Italie et un en Allemagne) en passant des imageries par résonance magnétique (IRM) et en répondant à des questionnaires réguliers. Seules des personnes âgées de moins de 60 ans et présentant une atteinte modérée d'un seul disque sont incluses dans l'essai, dont les résultats sont attendus dans trois à cinq ans. L'idée de ces recherches découle de travaux menés sur l'arthrose. « *Nous avons fait le choix de prélever des cellules souches de moelle osseuse chez des donneurs plutôt que d'utiliser les propres cellules graisseuses des patients car le geste est ainsi plus simple et le risque de contamination plus faible* », précise Christian Jorgensen qui espère « *développer un traitement innovant, efficace sur le long terme, non invasif et facile à généraliser* ».

Des recherches sur la régénération du disque sont aussi en cours — sur l'animal cette fois — à Nantes, dans l'unité Inserm U1229-RMeS (Médecine régénératrice et squelette) dirigée par le Pr Jérôme Guicheux. L'équipe a montré qu'un implant tissé en polycaprolactone pouvait interagir avec les cellules du disque, du moins chez le mouton. D'où l'espoir de régénérer la partie périphérique usée ou abîmée du disque et son noyau pulpeux, qui est expulsé en cas de hernie, irritant les nerfs périphériques et provoquant la douleur. Objectif : prévenir la dégénérescence discale et éviter les récidives de hernie. Jérôme Guicheux appelle cependant à la prudence : « *Nous ne savons pas encore régénérer un disque car le dialogue entre les différentes cellules qui le composent, complexe, reste mal connu.* » Au laboratoire RMeS, d'autres voies sont explorées, comme celle faisant appel à la bio-impression 3D pour mieux comprendre les mécanismes de dégénérescence discale.

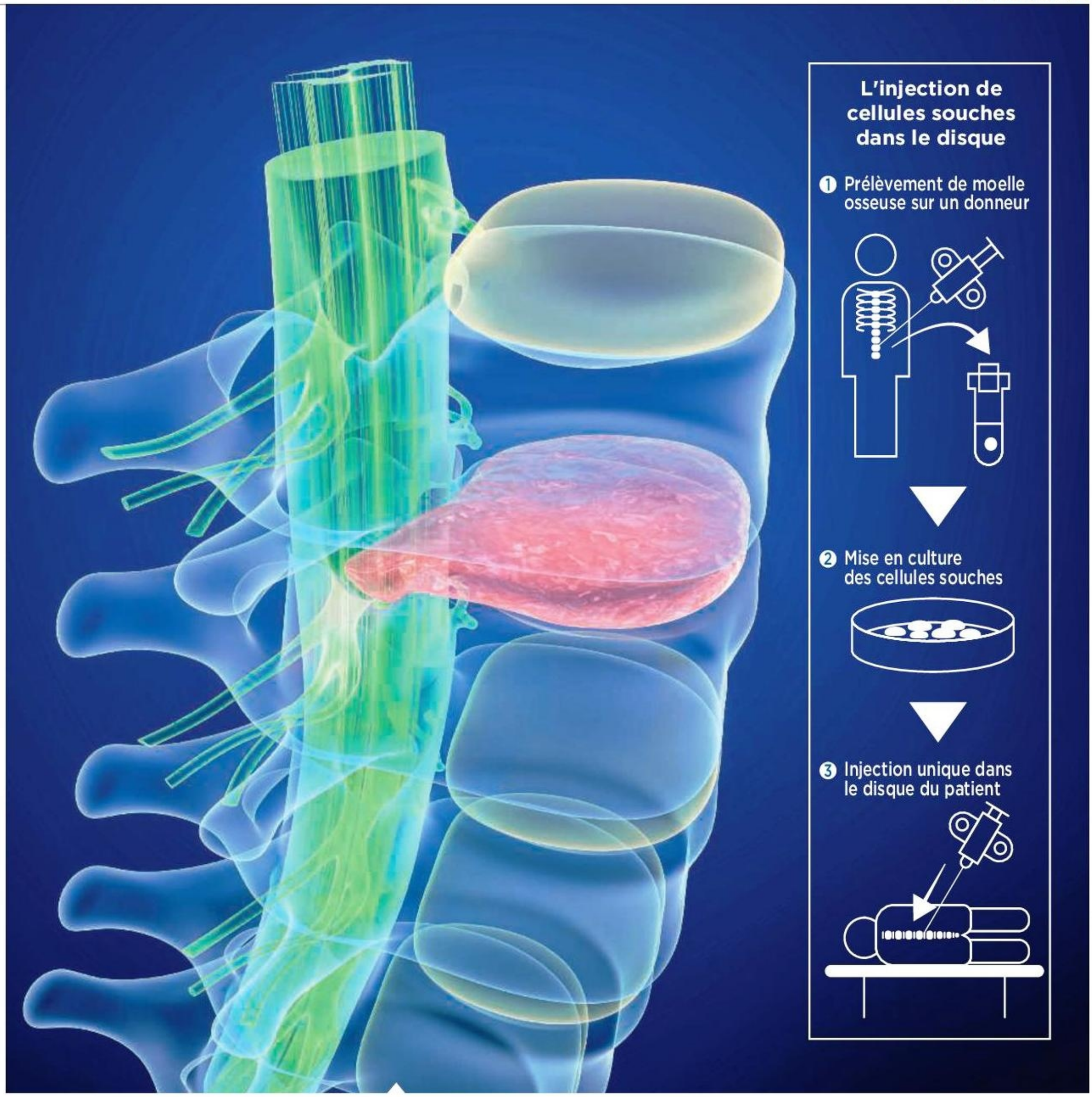
C. JORGENSEN

« Nous espérons développer un traitement innovant, efficace sur le long terme et non invasif »

Christian Jorgensen, directeur de l'Institut de médecine régénératrice et de biothérapie au CHU de Montpellier, coordinateur de l'essai clinique ReSpine

2 Stimuler le cerveau pour atténuer la douleur

Une stratégie pour le moins originale a été choisie par une équipe menée par Flavio Frohlich, psychiatre à l'université de Caroline du Nord (États-Unis), dont les résultats ont été publiés en 2018 dans *Journal of Pain*. Pour la première fois, les chercheurs ont eu recours à la stimulation transcrânienne pour réduire les douleurs lombaires en appliquant sur le cuir chevelu un courant élec-



BRUNO BOURGEOIS - SHUTTERSTOCK

Les cellules souches provenant de dons de moelle osseuse ont la capacité de produire des cellules du tissu squelettique, os et cartilage. Injectées directement dans le disque intravertébral, elles permettraient de le reconstituer. Un essai est en cours sur 112 patients.

trique alternatif très faible, soit 1000 fois moins que pour l'électrothérapie (électrochocs).
Des études utilisant des électro-encéphalogrammes (EEG) avaient déjà montré que les ondes cérébrales enregistrées dans certaines régions — comme le cortex somato-sensoriel impliqué dans la douleur chronique — étaient différentes selon que les patients éprouvaient ou non de la souffrance. Les chercheurs se sont focalisés sur un type particulier d'ondes (alpha) produites lorsque l'attention n'est pas sollicitée par des stimuli. Ils ont voulu savoir si ces oscillations alpha, déficientes dans le cortex somato-sensoriel des personnes souffrant de douleurs lombaires, pouvaient être modifiées et régularisées par le biais de la stimulation électrique dans le but de soulager ces patients. Vingt volontaires ont ainsi suivi deux séances d'électrostimulation de quarante minutes chacune, espacées de trois semaines. Les patients ont vu leur douleur réduite, et ce dès la première séance. Il reste à confirmer ces effets positifs sur des effectifs plus importants.

3 Pratiquer une injection dans le disque

Injecter directement des corticoïdes dans le disque intervertébral. C'est l'objectif des travaux ▸

pionniers de l'équipe du Pr François Rannou, chef du service de rééducation à l'hôpital Cochin à Paris dont les résultats ont été publiés dans la revue américaine *Annals of Internal Medicine* (2017). « *L'objectif était d'avoir une action anti-inflammatoire locale* », explique le chercheur. Résultat : un soulagement des douleurs lombalgiques observé pendant trente jours après l'injection chez des personnes atteintes d'une discopathie dite active (réveil nocturne et raideur au réveil). Cette approche, dont l'effet reste limité dans le temps, est désormais proposée à ces patients.

Autre piste de recherche : décomprimer les pressions qui s'exercent au niveau du disque en cas de hernie, c'est-à-dire quand le noyau glisse et irrite les racines des nerfs situés à proximité. Rappelons cependant que toutes les hernies ne s'opèrent pas et que 80 % d'entre elles régressent spontanément.

Depuis 2001, la chimionucléolyse — l'injection dans le disque lésé d'une enzyme (chymopapaïne) — qui consiste à détruire le noyau de la hernie a été stoppée pour des raisons commerciales. Une alternative a alors été développée : l'injection d'un gel (Discogel) d'éthanol et de microparticules de tungstène. « *Celui-ci redonne forme et consistance au disque* », explique le Pr Jacques Théron, à l'origine de cette innovation. L'opération se pratique sous anesthésie locale. D'un coût d'environ 2000 euros non remboursés par la Sécurité sociale, elle est pratiquée dans à peine une dizaine de centres en France. Depuis son autorisation il y a treize ans, 28 000 personnes ont déjà bénéficié de ce traitement, dont 5000 en France. Un essai clinique prévu sur 200 patients suivis dans six centres différents est en cours. Les résultats sont attendus en 2022.

GELSCOM

L'injection d'un gel d'éthanol et de tungstène permet de régénérer le disque lésé par une hernie.

4 De l'électricité dans les racines nerveuses

La radiofréquence pulsée (RFP) pourrait aussi être utilisée pour calmer les douleurs lombaires. Le traitement consiste, sous contrôle scanner, à appliquer un faible courant électrique avec une aiguille positionnée à proximité des racines nerveuses, dans le bas du dos. L'opération consiste à neutraliser les fibres nerveuses responsables de la transmission du message douloureux. Des travaux en ce sens, comme ceux menés par l'université de la Sapienza à Rome (Italie), ont été présentés au congrès annuel des radiologues américains en 2018. Selon les chercheurs italiens, 80 % des patients inclus dans l'essai se disaient toujours soulagés, un an après avoir bénéficié d'une seule séance de RFP. Des résultats encourageants qui doivent être confirmés. ■ **S. R.-M.**

APPLI POUR SMARTPHONE

Mieux repérer les patients à risque

Prédire le risque de mal de dos de manière personnalisée. Tel est l'un des objectifs de Back-4P, un outil numérique développé par la Dr Christelle Nguyen de l'équipe du Pr François Rannou à l'hôpital Cochin de Paris avec l'Inserm, la Société française de rhumatologie, la Fondation Arthritis et le Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur du CNRS. Objectif : mieux décrire les caractéristiques cliniques des patients susceptibles de souffrir de lombalgies chroniques avec un risque d'absentéisme au travail et de handicap. Les chercheurs estiment en effet qu'au-delà de douze semaines d'évolution — seuil définissant le passage à la chronicité — la probabilité de retour au travail s'amenuise pour atteindre 20 % après un an d'arrêt maladie et 0 % après deux ans. Les chercheurs prévoient ainsi d'établir une application de coaching personnalisé pour interrompre au plus tôt ce cercle vicieux. Pour cela, une « e-cohorte » est en cours de constitution, c'est-à-dire un recueil des données par le biais de questionnaires en ligne standardisés (Projet Compare)*.

* sciav.fr/876Compare

ÉVÉNEMENT 2020
EXPOSITION UNIVERSELLE DUBAI

Sciences et Avenir vous convie à une croisière unique, à l'occasion de l'exposition universelle de 2020 à Dubai.

L'événement promet en effet d'être sans précédent, et pas seulement parce qu'il s'agit d'une première dans la région Moyen-Orient, Afrique, où 180 pays se retrouveront ainsi rassemblés. Son thème, qui appelle à **« Construire le futur »** est en parfaite résonance avec la ligne éditoriale de Sciences et Avenir. Il projette en effet dans l'avenir, avec toutes les interrogations majeures du présent : quelles sciences (climatologie, génétique, intelligence artificielle...) pour assurer une économie et une société durables ? Quelles nouvelles technologies pour la mobilité, entre avions, fusées mais aussi trottinettes ! Quelles opportunités nouvelles voyons-nous surgir ? Notre futur promet d'être, en effet, celui que nous voulons bâtir, fort de nos héritages, mais aussi en phase avec la modernité. Ici, l'invitation à « connecter les esprits ». Ces promesses d'avancées, nous les analyserons avec des scientifiques, des économistes, des spécialistes de géopolitique et de nouvelles technologies, de très haut niveau. Et ce, lors d'une croisière étonnante, faisant étape à Dubai et au Pavillon Français de l'Exposition Universelle, mais aussi à Abu Dhabi et son musée du Louvre, construit par l'architecte Jean Nouvel, ou encore en visitant la Rose des Sables, musée du Qatar à Doha... Des découvertes et des rencontres passionnantes en perspective.

Dr Dominique LEGLU
Directrice de la rédaction de Sciences et Avenir

AVEC VOUS À BORD !
Les conférenciers

Mikaa MERED
Professeur de géopolitique, observateur et analyste des Emirats Arabes, spécialiste des pôles et de l'hydrogène.

Marie-Christine de WARENGHIEN
Incontournable pour les architectours à Dubai & Abu Dhabi.

Graph. www.pascalem.com - Crédits photos : Pixabay CCO - Expo 2020 Dubai

SCIENCES ET AVENIR

Challenges

CROISIÈRE
LA MAGIE DES EMIRATS

10 JOURS / 7 NUITS
DU 12 AU 21 NOV. 2020
A BORD DU COSTA DIADEMA

- 1 JOUR À L'EXPOSITION UNIVERSELLE DE DUBAI
- ENTRÉES FAST TRACK
- VISITE DU PAVILLON FRANÇAIS
  Conférence et cocktail dînatoire (sous réserve de confirmation)
- EXCLUSIVITÉ : L'ARCHITECTOURS À DUBAI ET ABU DHABI.
  Présence de votre spécialiste Marie-Christine de WARENGHIEN
- VISITE GUIDÉE MUSÉE DU LOUVRE ABU DHABI
  Œuvre de Jean Nouvel
- VISITE DE LA MOSQUÉE D'ABU DHABI,
  assistez au coucher du soleil, illuminations le soir
- VISITE DU PALAIS PRÉSIDENTIEL À ABU DHABI
- VISITE DU MUSÉE LA ROSE DES VENTS À DOHA
  Œuvre de Jean Nouvel
- VISITE DE LA BURJ EL KHALIFA
  LA TOUR LA PLUS HAUTE DU MONDE À DUBAI
- BOISSONS À TABLE INCLUSES ET FORFAIT SÉJOUR À BORD

À PARTIR DE
2 750 €/PERS.
Au départ de Paris - En tout inclus

RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS :
BLEU VOYAGES
213 rue de Gerland - Bat 2 - 69007 LYON
TÉL. 04 72 76 75 66
www.challenges2020.fr

Selectour Bleu Voyages Costa

Neige et Soleil Voyages SAS au capital de 396 800 € • RC Bourgoin Jallieu B 398 629 766 • Code APE 7911 Z • Immatriculation Atout France 038110038 • Agence garantie par l'APST • 15 Avenue Carnot - 75017 Paris • Agence assurée pour sa responsabilité civile et professionnelle par le groupe MMA Entreprises n° de contrat 144569079.

Comment le mal de dos peut être évité

Des phénomènes mécaniques, comme le surpoids ou de mauvaises postures dues à des chaussures inadaptées, sont à l'origine des souffrances les plus courantes. Autre facteur aggravant : le stress. Explications.

Baskets
Le port de ce type de chaussures doit être réservé aux activités physiques.

Agir sur le poids

Perdre du poids soulage la colonne vertébrale. On ne compte plus les études qui ont mis en évidence le lien entre obésité et mal de dos, voire le passage au stade chronique. Deux phénomènes ont été décrits. Le premier est mécanique. Pour aider à supporter le poids du corps, les vertèbres situées en haut de la colonne (cervicales) sont plus petites que les cinq dernières (lombaires). À l'inverse, les disques intervertébraux sont plus épais à la base qu'au sommet. Or, en cas de prise de poids, la musculature abdominale se relâche et les forces de compression sur les disques sont plus élevées, ce qui entraîne une souffrance.

Le second phénomène, moins connu, est celui de l'inflammation. Les chercheurs ont établi que l'obésité abdominale est caractérisée par la présence d'un syndrome inflammatoire dit à bas bruit associé à la présence dans le sang de substances pro-inflammatoires (interleukines, adipokines...). Or, toutes conduisent à détériorer plus rapidement le cartilage et donc les structures discales. Une destruction qui s'effectue très lentement par l'intermédiaire de nombreux types de cellules, notamment les macrophages et les lymphocytes T. Ces dernières infiltrent le tissu graisseux constitué d'adipocytes, les poussant à produire des molécules pro-inflammatoires, sources de complications métaboliques potentiellement graves (diabète, troubles cardiovasculaires...). ■ **S. R.-M.**

POUR EN SAVOIR PLUS

Livres

- **80 Exercices pour en finir avec le mal de dos,** Jean François Harvey, éditions Médicis.
- **Tourner le dos au mal du siècle,** Dr Brice Édouard, Marabout.
- **Le Dos en compote,** Aline Perraudin, Flammarion

Internet

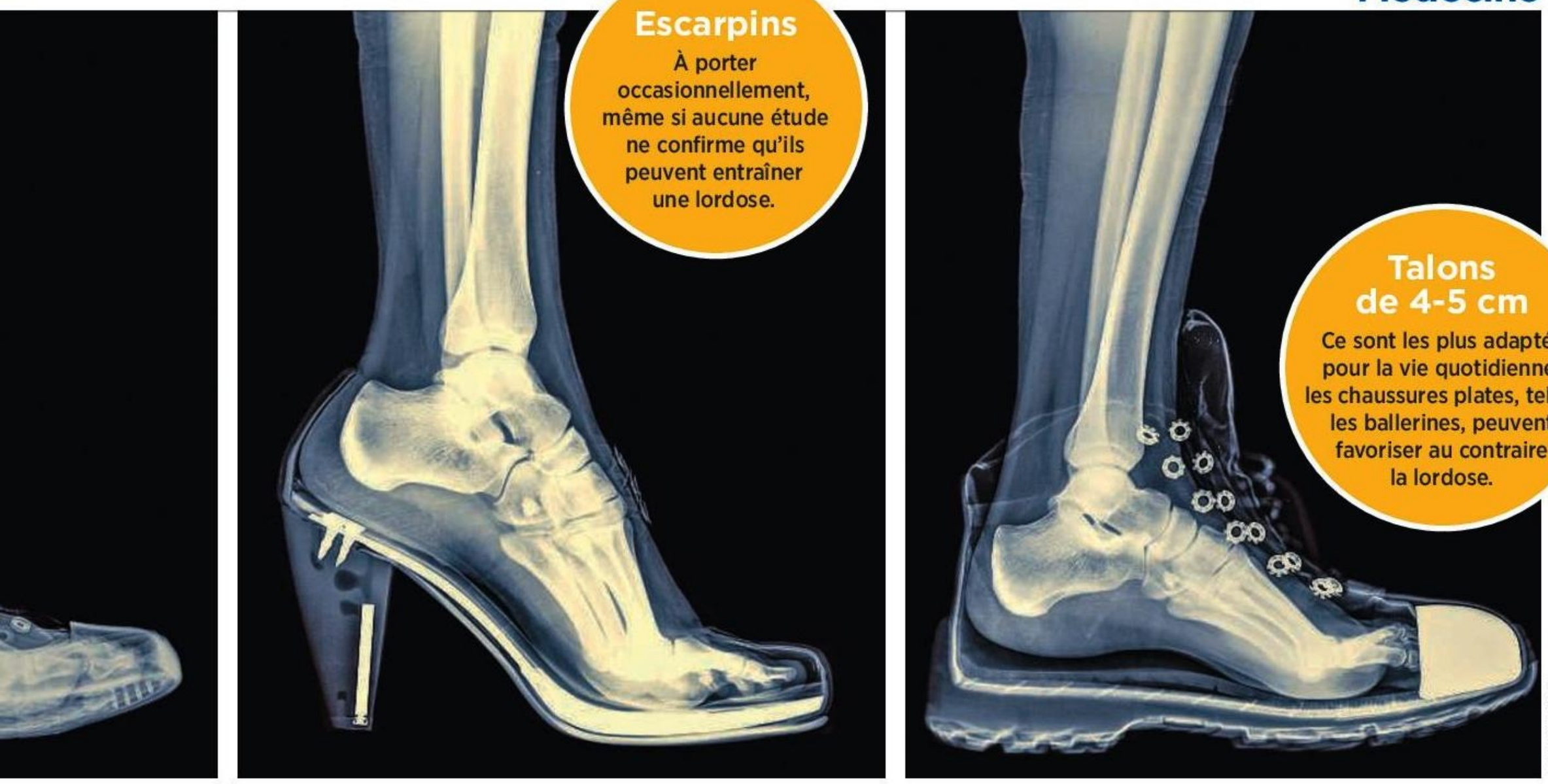
- Site du kinésithérapeute Éric Bouthier : **comprendresondos.fr**
- Brochure de l'Assurance-maladie « Je souffre de lombalgie de quoi s'agit-il et que faire ? » : **sciav.fr/876dos**
- Si vous souffrez de lombalgie et souhaitez participer à l'enquête des Hôpitaux de Paris sur la lombalgie chronique : **sciav.fr/876Compare**

Lutter contre le stress

Si le stress est très souvent évoqué en cas de douleur chronique — parfois faute de trouver le vrai coupable —, les preuves sont indéniables pour la lombalgie. La Haute Autorité de santé a épluché la littérature scientifique pour établir ses recommandations en 2019. Pour elle, « *le stress, la dépression, l'anxiété, une tendance à une humeur dépressive et le retrait des activités sociales* » sont clairement en cause. Ces facteurs augmentent le risque de passage à un stade chronique et donc celui d'incapacité prolongée car ils peuvent déclencher des tensions ou des contractions musculaires dans le dos. Le stress altère en effet la proprioception, cette perception souvent inconsciente de la position dans l'espace des différentes parties du corps.

Mais ce n'est pas la seule cause : le stress entraîne la libération dans l'organisme de substances pro-inflammatoires qui, en cas de chronicité, favorisent les lombalgies. C'est pourquoi les personnes stressées ont intérêt à pratiquer des techniques de relaxation comme la méditation ou l'hypnose, en complément d'une activité physique. Plusieurs études ont ainsi montré que la réduction du stress fondée sur la méditation avait une efficacité sur la douleur à court et long terme. Raison pour laquelle cette pratique, comme celle du yoga (*lire aussi p. 35*), est recommandée officiellement dans le traitement de la lombalgie aux États-Unis et au Canada.

Par ailleurs, pratiquer régulièrement une activité physique fait aussi baisser le niveau de stress. Taper dans une balle, nager ou danser entraîne la sécrétion des endorphines, de la sérotonine, de la dopamine... autant de messagers chimiques associés au bien-être. Les sports d'endurance réduisent en outre la présence de cytokines interleukines, des peptides qui



AGEFOTOSTOCK

joueraient un rôle dans l'apparition de la dépression. ■ C. Co.

Trouver chaussure à son pied

Ballerines ou baskets plutôt que talons hauts..., le choix semble aller de soi pour les femmes qui souffrent de douleurs lombaires. Pourtant, *« les talons hauts peuvent modifier la posture mais aucune étude n'a démontré qu'ils pouvaient être responsables de mal de dos »*, affirme Éric Bouthier, kinésithérapeute à Lyon. Plusieurs études ont ainsi remis en question ce qui pourrait bien être une idée reçue. Un essai mené par des chercheurs de l'Institut de biomécanique de Zurich (Suisse), et publié dans *Gait & Posture* (2017) a montré que les amatrices de talons aiguilles dont la hauteur est de 10 cm n'auraient pas plus de lordose (courbure anormale de la colonne vertébrale) que la moyenne. Au contraire, les chaussures les plus plates accentueraient cette courbure. Une autre étude parue dans le *Bulletin of Faculty of Physical Therapy* (2017) parvient à un résultat similaire : le port de talons hauts n'a pas d'impact sur l'activation des muscles dorsaux.

Pourtant, le choix des chaussures n'est pas anodin, y compris pour les hommes. Le plus important est de se sentir confortable car si la moindre douleur apparaît, chacun a tendance à modifier sa façon de marcher et son équilibre. Or, plus la position reste naturelle, mieux le dos se porte. Il faut cependant savoir que le centre de gravité est différent selon les personnes, l'équilibre de la colonne vertébrale n'étant pas non plus le même. Certaines femmes seront à l'aise sur des talons quand d'autres préféreront les ballerines. En fait, le dos apprécie la variété. L'idéal est d'adapter ses chaussures à son activité : les baskets pour le sport, les chaussures à talons d'environ 4-5 cm pour la vie quotidienne et les escarpins occasionnellement. ■ C. Co.

KINÉSITHÉRAPIE, OSTÉOPATHIE

Entre les mains d'un pro

Neuf fois sur dix, le lumbago (ou « tour de rein »), n'est plus qu'un mauvais souvenir au bout de quelques jours. Il nécessite pourtant une prise en charge médicale dans un certain nombre de cas. Tout d'abord, il faut s'assurer qu'il s'agit bien d'une lombalgie commune, due à un traumatisme passager, et que la douleur n'est pas due à une tumeur, infection, maladie inflammatoire ou encore un problème neurologique. *« Le rôle essentiel du médecin généraliste est ensuite de rassurer »*, prévient le Dr Florian Bailly, rhumatologue, médecin de la douleur à Paris et coauteur des recommandations de la Haute Autorité de santé (HAS). De plus, s'il estime que ce mal de dos risque de devenir chronique, le praticien oriente son patient vers un kinésithérapeute, voire un ostéopathe (au statut réglementé). Les séances de kinésithérapie ont démontré leur efficacité à condition que le patient soit actif, et qu'il pratique les exercices chez lui. Les séances d'ostéopathie, *« potentiellement efficaces dans les douleurs d'origine vertébrales »* (Inserm), vont permettre de tenter de soulager l'excès de pression sur les disques et aider les patients à abandonner la position entraînant des contractures. Contrairement aux séances de kinésithérapie, celles d'ostéopathie ne sont pas remboursées par la Sécurité sociale. C. Co.

L'histoire du système solaire se lit dans les roches

La configuration des astres est gravée au cœur des roches terrestres au moment de leur formation. En décryptant ces indices liés au climat et à la configuration de l'orbite terrestre, des astronomes ont pu reconstituer le passé du système solaire sur 200 millions d'années.

Par Azar Khalatbari

L'ORBITE DE LA TERRE a-t-elle connu des périodes de grande instabilité ? Mars, Vénus et notre planète se percuteront-elles dans un avenir lointain ? Ces deux hypothèses seraient tout à fait possibles à en croire une équipe internationale et pluridisciplinaire à laquelle participe le Français Jacques Laskar, astronome à l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (CNRS et observatoire de Paris). Pour la première fois, au prix d'un patient travail de terrain, ces scientifiques sont en effet parvenus à reconstituer le passé du système solaire il y a 200 millions d'années. Soit une durée inédite. Pour ce faire, les chercheurs n'ont nullement levé les yeux vers les étoiles mais les ont au contraire... rivés au sol. Pendant plusieurs années, ils ont traqué des indices de la position des astres à flanc de falaises, au fond des carrières ou au sein des dépôts glaciaires... Et leur étude, dont la première partie a été publiée dans la revue américaine *PNAS* voilà quelques semaines, confirme que les planètes ont connu un passé très chaotique pendant des centaines de millions d'années... et que leur avenir n'est pas plus stable.

Pour comprendre l'intérêt de ce travail pionnier, il faut rappeler que les lois qui régissent les mouvements des planètes sont connues depuis le XVII[e] siècle, grâce notamment aux équations formulées par le physicien britannique Isaac Newton. Ainsi, des générations de chercheurs sont parvenus à prédire la date des éclipses ou le passage des comètes, ce qui les a confortés dans l'idée d'un monde totalement prédictible. Au point qu'au début du XIX[e] siècle, le physicien Pierre-Simon de Laplace estimait qu'en connaissant la position actuelle des astres et les lois de la nature, il était possible d'en déduire leur configuration dans un très lointain passé ou futur. Las ! ce déterminisme a volé en éclats lorsque le mathématicien français Henri Poincaré a étudié le « *problème à N corps* », devenu un classique de l'astronomie et des mathématiques : il stipule qu'un système composé de trois corps et plus (ici, des astres), devient très sensible aux conditions initiales et adopte un comportement chaotique. En clair, une petite imprécision sur la position initiale se traduit par de très grands écarts dans les prédictions. Ce principe est souvent connu du grand public sous le nom « d'effet papillon », une image élaborée en 1972 par le météorologue américain Edward ▶

JUAN-CARLOS MUNOZ/BIOSPHOTO - L. VILLERET / PINK / SAIF IMAGES

JACQUES LASKAR

Un observateur du chaos

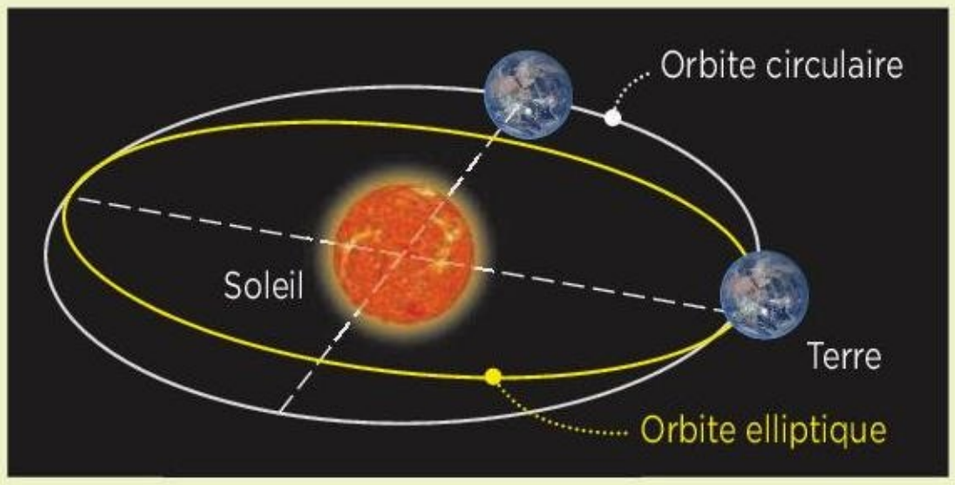
Astronome à l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (CNRS et observatoire de Paris), Jacques Laskar a reçu en 2019 la médaille Milutin-Milankovitch décernée par l'Union européenne des géosciences pour ses travaux sur les liens entre l'orbite des planètes et les paléoclimats. Dès 1993, dans un article de la revue *Nature*, il démontrait que, sans la présence de la Lune, l'axe de rotation de la Terre aurait varié de manière très chaotique (entre 0 et 85°), provoquant des instabilités climatiques empêchant le développement de la vie. Après avoir démontré le caractère chaotique du système solaire grâce à des simulations numériques sur 60 millions d'années, il est parvenu à l'étendre sur 200 millions d'années grâce à la géologie.

Les bois pétrifiés (ici sur le plateau du Colorado, aux États-Unis), comme les dépôts sédimentaires, gardent indirectement la mémoire de la configuration précise de l'orbite terrestre.

CYCLES DE MILANKOVITCH

3 paramètres pour expliquer les périodes glaciaires

Il y a 12 000 ans, la glace recouvrait tout le nord de l'Europe, l'Angleterre, une partie de l'Allemagne et le nord de l'Italie. Le niveau des mers était de 120 mètres plus bas qu'aujourd'hui, dessinant un trait de côte très différent. La Terre était dans une période glaciaire, qui a pris fin il y a 11 600 ans. Nous sommes donc aujourd'hui dans une période interglaciaire. Les différents indices indiquent qu'au cours des 600 000 dernières années, 4 périodes glaciaires se sont succédé. Appelées paramètres de Milankovitch, en l'honneur du géophysicien, astronome et météorologue serbe, Milutin Milankovitch, disparu en 1958, ces variations climatiques à très long terme sont liées à trois paramètres particuliers de l'orbite de la Terre : « l'excentricité » de l'orbite, « l'obliquité » de son axe de rotation, la précession des équinoxes *(voir ci-contre)*. La superposition des trois aboutit à un cycle de 21 000 ans environ qui influence l'ensoleillement, la date du début des saisons et les précipitations. Les géologues tentent de repérer les indices de ces fluctuations pluridécennales du climat dans les roches. Une tâche très difficile qui a pu être accomplie sur les dernières 220 millions d'années.

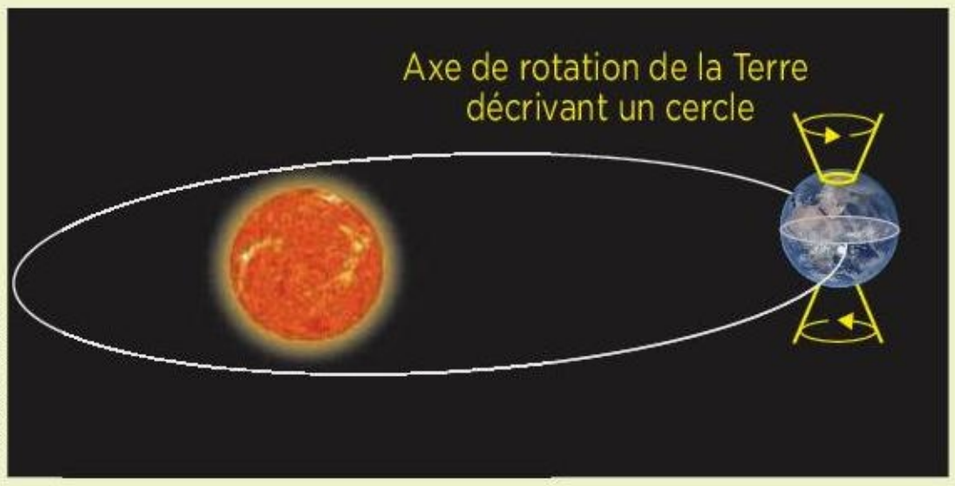


L'EXCENTRICITÉ DE L'ORBITE DE LA TERRE

▸ Tous les 10 000 ans, puis aussi tous les 400 000 ans, la planète décrit un cercle parfait au lieu d'une ellipse, avec une variation d'à peine 5 % due à des perturbations gravitationnelles, en raison de Vénus essentiellement.

L'OBLIQUITÉ

▸ C'est l'angle que fait le plan de l'orbite avec le plan de l'équateur. Cet angle varie tous les 41 000 ans.



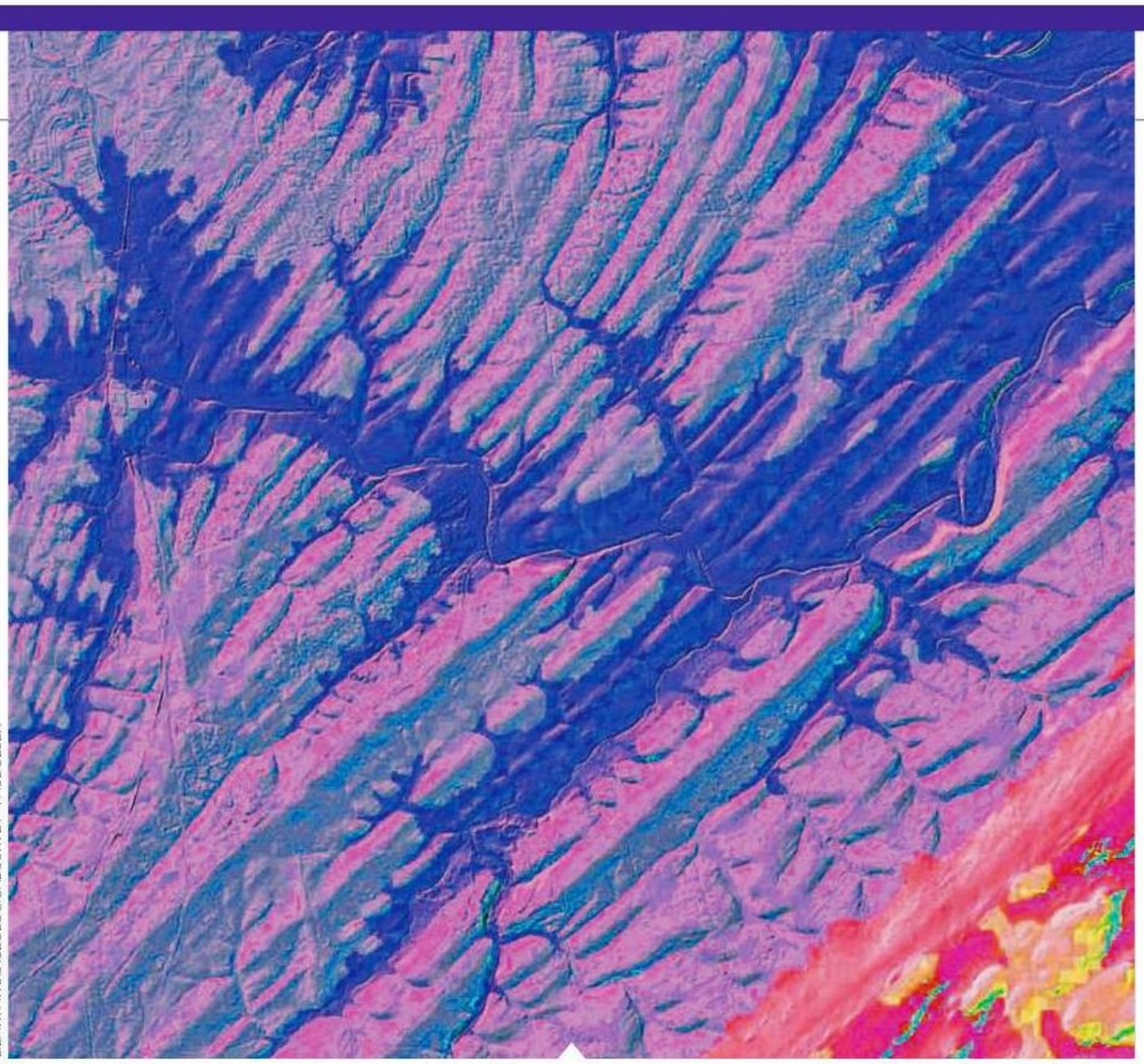
BRUNO BOURGEOIS

LA PRÉCESSION DES ÉQUINOXES

▸ Cette expression désigne le fait que, comme une toupie en fin de parcours, l'axe de rotation de la Terre décrit un cercle tous les 19 000 à 23 000 ans.

▸ Lorenz, l'un des pères de la théorie dite du chaos : le battement d'aile d'un papillon ici peut provoquer une tornade aux antipodes. Jusque dans les années 2000, le système solaire était considéré comme stable avant que les premiers travaux de Jacques Laskar ne démontrent le contraire. Résultat : malgré tous les moyens d'observation actuels dont disposent les chercheurs, les modèles fondés sur la gravité ne parviennent pas à prédire — par le calcul — la position des planètes au-delà de 60 millions d'années dans le passé et dans le futur. Quand on effectue ce calcul, *« les écarts sur les prédictions sont multipliés par 10 tous les 10 millions d'années »*, précise en effet Jacques Laskar. D'où l'idée de chercher une *« astuce »* pour reconstituer d'une manière ou d'une autre la position exacte des astres à des temps différents, pour réduire l'incertitude du modèle et le rendre performant sur de très longues périodes.

C'est dans ce contexte que l'interdisciplinarité a porté ses fruits. Avec le géologue américain Paul E. Olsen, de l'université Columbia à New York (États-Unis), qu'il connaît depuis plus de vingt ans, l'astronome Jacques Laskar s'intéresse aux couches géologiques. Les dépôts sédimentaires qui s'accumulent au fil des siècles ne sont en effet pas uniformes. Chaque couche porte en elle, de manière « cryptée » et indirecte, la mémoire des conditions climatiques à l'époque de sa formation. Lesquelles correspondent... à une configuration précise de l'orbite de la Terre. Par exemple, pour déterminer si l'ensoleillement était important au sein d'une région voilà des centaines de millions d'années, il faut traquer les isotopes de l'oxygène dans des



LIDAR PAR U.S. GEOLOGICAL SURVEY - PAUL OLSEN

Les strates de sédiments repérées par lidar dans un lac du New Jersey (États-Unis) datent d'il y a 200 millions d'années. Leur colorisation a mis en évidence leurs différentes périodes de formation (en violet, quand le climat était humide et le lac profond ; en vert, des sédiments plus durs lorsque le climat était plus sec).

neiges de l'époque. « *La quantité de l'isotope 18 de l'oxygène par rapport à l'isotope 16 varie avec la température ambiante* », précise le chercheur. En effet, l'oxygène présent dans la molécule d'eau (H_2O) est sous forme de ^{16}O à plus de 99 %, mais contient aussi l'isotope ^{18}O à hauteur de 0,2 %. Leur masse diffère de 8 % et ^{16}O, plus léger, s'évapore plus facilement si la surface de l'océan s'échauffe en raison d'une hausse des températures. Les nuages s'enrichissent donc en ^{16}O et la neige qui en est issue forme une glace qui en est enrichie. À l'inverse, en période de froid, celle-ci se trouve enrichie en ^{18}O. En analysant les variations des isotopes de l'oxygène dans une carotte de glace, il est ainsi possible de remonter aux variations de température, donc au taux d'ensoleillement du lieu et donc à la configuration orbitale de la Terre par rapport au Soleil. C'est ainsi que le géophysicien serbe Milutin Milankovitch a montré, au début du XX^{e} siècle, que les variations orbitales sont responsables de la succession des périodes glaciaires et interglaciaires *(lire l'encadré)*. Mais une chose est de soupçonner le rôle des orbites dans la géologie, une autre est de retrouver ces « cycles de Milankovitch » sur le terrain, dans les roches érodées couvertes de végétation. Pour établir des correspondances, Jacques Laskar et ses collègues ont notamment arpenté le bassin de Newark dans le New Jersey et le plateau du Colorado, aux États-Unis, pour affiner quelques indices dans des carottes de sédiments remontant au trias-jurassique, il y a 200 millions d'années. Et en calant la position des astres ainsi grâce à la géologie, il est désormais possible d'estimer la position des astres il y a 200 millions d'années. Avec, à la clé, une surprise : le chaos semble bel et bien dominer le système solaire, puisqu'il apparaît qu'il y a 200 millions d'années, la forme de l'orbite de la Terre oscillait sur une période de 1,7 million d'années, contre 2,4 millions d'années aujourd'hui. Un changement graduel qui a dû affecter la durée des périodes glaciaires.

Pas de prévision à long terme

Pourtant, les résultats de l'équipe internationale permettent-ils de prédire le futur de notre système solaire ? Oui, pour les 60 prochains millions d'années. Au-delà le calcul devient probabiliste : ainsi, un précédent travail de l'équipe, a démontré — au terme de 7 millions d'heures de calcul effectuées sur le supercalculateur Jade au Cines de Montpellier — que dans 1 % des cas l'orbite de Mercure devenait instable au point de rendre possible une collision entre Mars, Vénus et la Terre en moins de 5 milliards d'années. Dans ce contexte, les astéroïdes se comportent comme des trublions…

« *Ces petits corps célestes qui gravitent entre Mars et Jupiter ont des mouvements chaotiques à de plus petites échelles, autour de 20 000 ans*, explique Jacques Laskar. *Leur présence nous interdit toute prévision à très long terme. En particulier, nous ne pouvons pas prévoir les trajectoires des deux plus gros objets de la ceinture d'astéroïdes, Cérès et Vesta, à compter de 500 000 ans seulement.* » Une pichenette gravitationnelle suffit en effet à en faire des bolides de l'espace venant jouer aux quilles avec les astres. D'où la nécessité constante de surveiller les abords de la planète. ■

Il est impossible aux chercheurs de prédire le futur du système solaire au-delà de 60 millions d'années. Les astéroïdes animés de mouvements chaotiques jouent les trublions

ExoMars, un atterrissage à haut risque

La mission russo-européenne doit décoller en juillet avec à bord un rover d'exploration du sol martien. Problème : les parachutes chargés de ralentir la sonde filant à 21000 km/h ne sont toujours pas opérationnels.

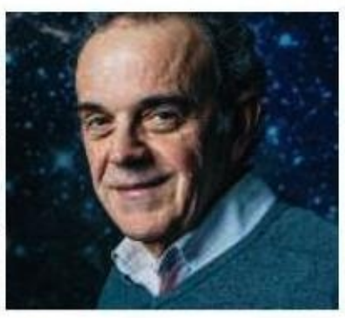
NASA/JPL-CALTECH

L'éjection des parachutes a été modifiée et testée au Jet Propulsion Laboratory de la Nasa, à Pasadena (États-Unis).

SUSPENSE. La mission ExoMars s'envolera-t-elle cet été vers la planète Rouge ? Rien n'est moins sûr. « *Même si des progrès encourageants ont été enregistrés ces dernières semaines, une course contre la montre est toujours engagée pour résoudre un problème lié à l'atterrissage de la sonde* », confie François Spoto, coordinateur du projet mené par l'Agence spatiale européenne (ESA), le plus ambitieux qu'elle ait jamais entrepris sur Mars. Réalisé en partenariat avec l'agence spatiale russe Roscosmos, ExoMars doit faire atterrir une capsule de deux tonnes sur un ancien bassin argileux, non loin de l'équateur, qui abritait un lac d'eau liquide il y a 4 milliards d'années. Elle transporte la plate-forme d'atterrissage Kazachok, truffée d'instruments de mesure. Mais — surtout — un rover, le premier conçu par l'ESA, nommé Rosalind-Franklin en hommage à la codécouvreuse de la structure de l'ADN. Il creusera jusqu'à deux mètres de profondeur pour chercher des traces d'une éventuelle vie passée *(lire l'encadré p. 48)*. Or si ce rover ultra-perfectionné et la plate-forme scientifique semblent fonctionner à merveille, les ingénieurs butent sur un ultime problème : les parachutes permettant de ralentir suffisamment le vaisseau pour qu'il se pose en douceur sur le sol...

Atterrir sur Mars, qui gravite à des dizaines de millions de kilomètres de la Terre, reste une gageure. « *Sur 17 tentatives depuis les années 1970, seule une petite moitié a été couronnée de succès*, rappelle Francis Rocard, responsable des programmes d'exploration du Système solaire au Centre national des études spatiales (Cnes). *En outre, toutes les réussites étaient américaines, la dernière en date étant la mission InSight il y a un peu plus d'un an.* » Jusqu'à présent, les autres puissances spatiales ont en effet systématiquement échoué. En 2016, dans le cadre du premier volet du programme ExoMars, l'atterrisseur Schiaparelli s'était écrasé. « *L'ouverture du parachute a secoué violemment le vaisseau et l'a fait tournoyer, ce qui a faussé les mesures d'altitude*, explique Francis Rocard. *Croyant que l'engin avait atterri, le calculateur de bord a coupé les moteurs, laissant chuter Schiaparelli alors qu'il se trouvait encore à 3 km de la surface.* » Pas question de revivre un tel incident !

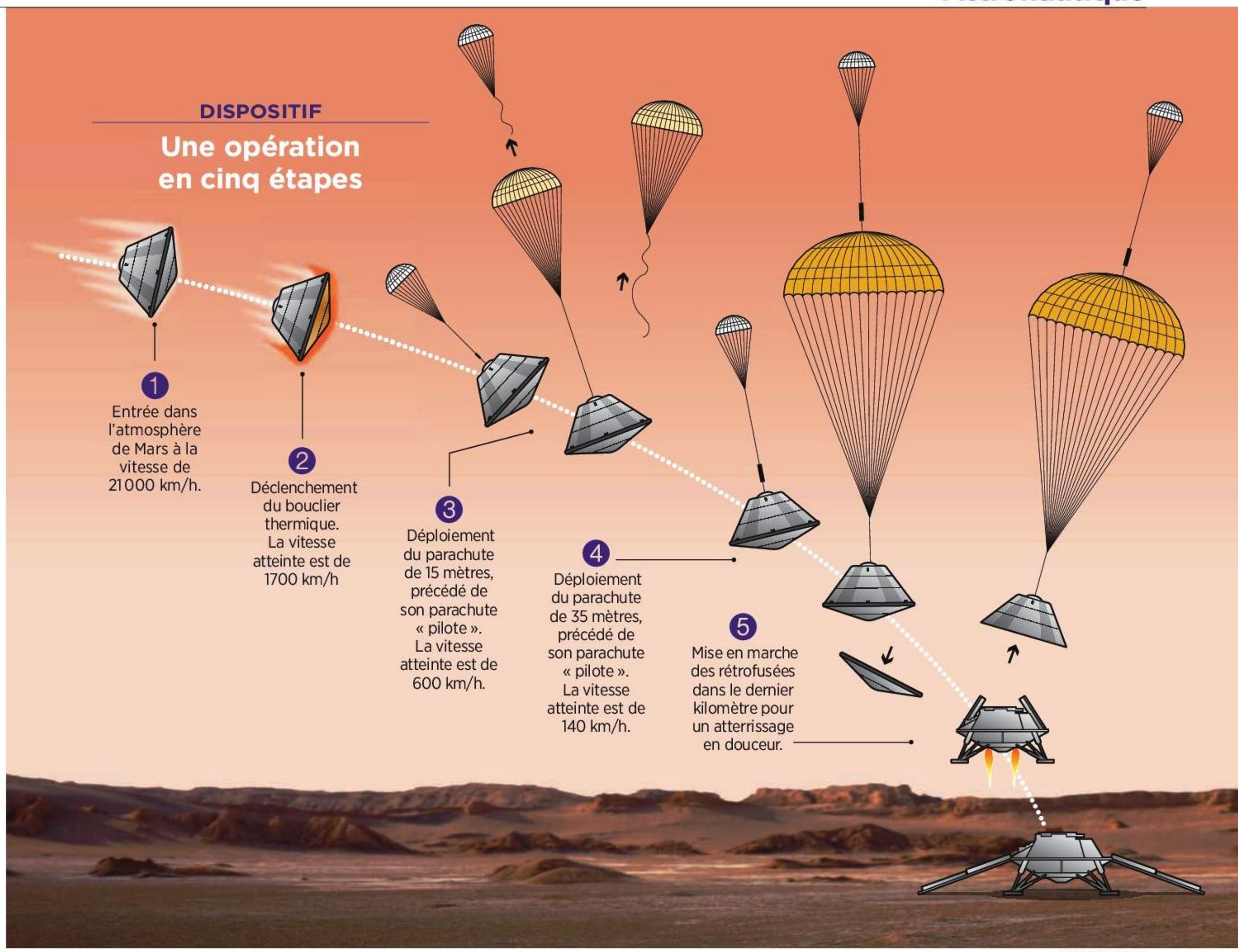
Une série de manœuvres délicates et de séquences de freinage est donc prévue pour le second volet d'ExoMars, censé quitter la base de Baïkonour (Kazakhstan) le 25 juillet. Alors qu'il arrivera à la vitesse faramineuse de 21000 km/h dans la haute atmosphère de Mars, le vaisseau utilisera un bouclier thermique pour réduire son allure à 1700 km/h. Il larguera alors cette carapace en carbone et actionnera un parachute de 15 mètres de diamètre déployé à l'aide d'un petit parachute « pilote » *(voir l'infographie page suivante)*. Lorsque la vitesse ne sera plus « que » de 600 km/h, un parachute de 35 mètres sera à son tour déplié par un mécanisme analogue. Enfin, dans le dernier kilomètre, des rétrofusées entreront en action. Elles permettront



J. FAURE/LEEXTRA/LEEMAGE

« Sur les 17 tentatives de se poser sur la planète Rouge, seule une petite moitié a été couronnée de succès »

Francis Rocard, responsable des programmes d'exploration du Système solaire au Centre national d'études spatiales (Cnes)



BRUNO BOURGEOIS

de réduire les vitesses verticales et horizontales à des valeurs quasiment nulles lorsque la sonde touchera le sol.

En 2018, l'ESA avait testé avec succès son dispositif de 35 mètres en Laponie suédoise à une altitude d'un kilomètre environ. Et se félicitait, alors, d'avoir conçu le plus grand parachute martien ! Trois fois plus que celui d'InSight, par exemple, qui devait atterrir dans les mois suivants. « *Le système de parachutes est déterminé par la capacité de freinage des rétrofusées*, explique toutefois François Spoto. *Or les nôtres, fabriquées par les Russes, sont moins puissantes que celles des Américains, d'où l'utilisation de quatre parachutes — deux principaux et deux auxiliaires — dont un de très grande dimension.* » Las ! des problèmes ont commencé à apparaître en mai 2019 lors des tests à haute altitude, à 27 km, où la pression est similaire à celle de Mars. Largués depuis un ballon, les parachutes de 15 et de 35 mètres se sont, certes, correctement déployés depuis les sacs où ils sont empaquetés, avec leur toile et des dizaines de cordes… mais l'ESA a constaté des déchirures lorsque les coupoles ont été récupérées au sol. « *Nous avons tout tenté pour trouver au plus vite des solutions* », assure François Spoto. Mais en août dernier, c'est la douche froide : à la suite de nouveaux essais à haute altitude, les mêmes déchirures sont observées. L'ESA s'est donc résolue, en urgence, à demander de l'aide… aux Américains ! « *Beaux joueurs, ils ont répondu favorablement*, indique Francis Rocard. *Ce qui n'avait rien d'évident ! Je connais nombre d'exemples où la Nasa, jalouse de son hégémonie et de ses technologies spatiales qui ont souvent partie liée avec les militaires, a toujours fermé les portes.* » Qu'est-ce qui a décidé la Nasa à prêter main-forte au projet russo-européen ? Le contexte, ▶

probablement. Depuis quelques mois, la Nasa et l'ESA mettent en forme un programme commun très ambitieux de retour d'échantillons martiens sur Terre au début des années 2030, chiffré à 7 milliards de dollars. « *D'où l'intérêt de l'agence américaine de ne pas froisser un si important partenaire en pareil moment* », estime François Spoto. Le spécialiste avance une autre raison : « *Après avoir réussi huit atterrissages sur Mars, les Américains souhaitent aussi, peut-être, donner l'image d'une puissance spatiale capable de faire progresser les autres...* » Et se comporter ainsi en

Les Américains, beaux joueurs, ont accepté de prêter main-forte aux Européens

« grand frère » apportant les solutions qu'il serait seul à connaître et maîtriser. Il faut dire que la Nasa a dépensé près de 350 millions de dollars pour développer ses parachutes martiens, soit dix fois plus que l'ESA.
Le Jet Propulsion Laboratory de la Nasa à Pasadena (Californie) a ainsi expliqué que les problèmes rencontrés par l'ESA étaient dus aux frictions à l'intérieur des sacs. Lorsque les parachutes-pilotes sont éjectés par des mortiers pour tirer les parachutes principaux, ces derniers traversent plusieurs compartiments s'ouvrant les uns à la suite des autres. Les toiles filent à très grande vitesse, entre 250 et 280 km/h alors que les compartiments ne s'ouvrent manifestement pas à la bonne vitesse : les toiles frottent violemment sur les bords, produisant des échauffements puis des déchirures. Sur les conseils du JPL, l'agence européenne a ainsi modifié l'extraction pour la rendre plus « fluide ». Les compartiments se « dépaquettent » plus rapidement et les ouvertures ont été badigeonnées de Teflon. En outre, les parachutes sortent désormais de la partie centrale des sacs et non des bords extérieurs.

ESA/AOES MEDIALAB, M. THIEBAUT

Rosalind-Franklin, utilisera une perceuse munie de 4 forets pour analyser des échantillons dans le sol martien.

INSTRUMENTS

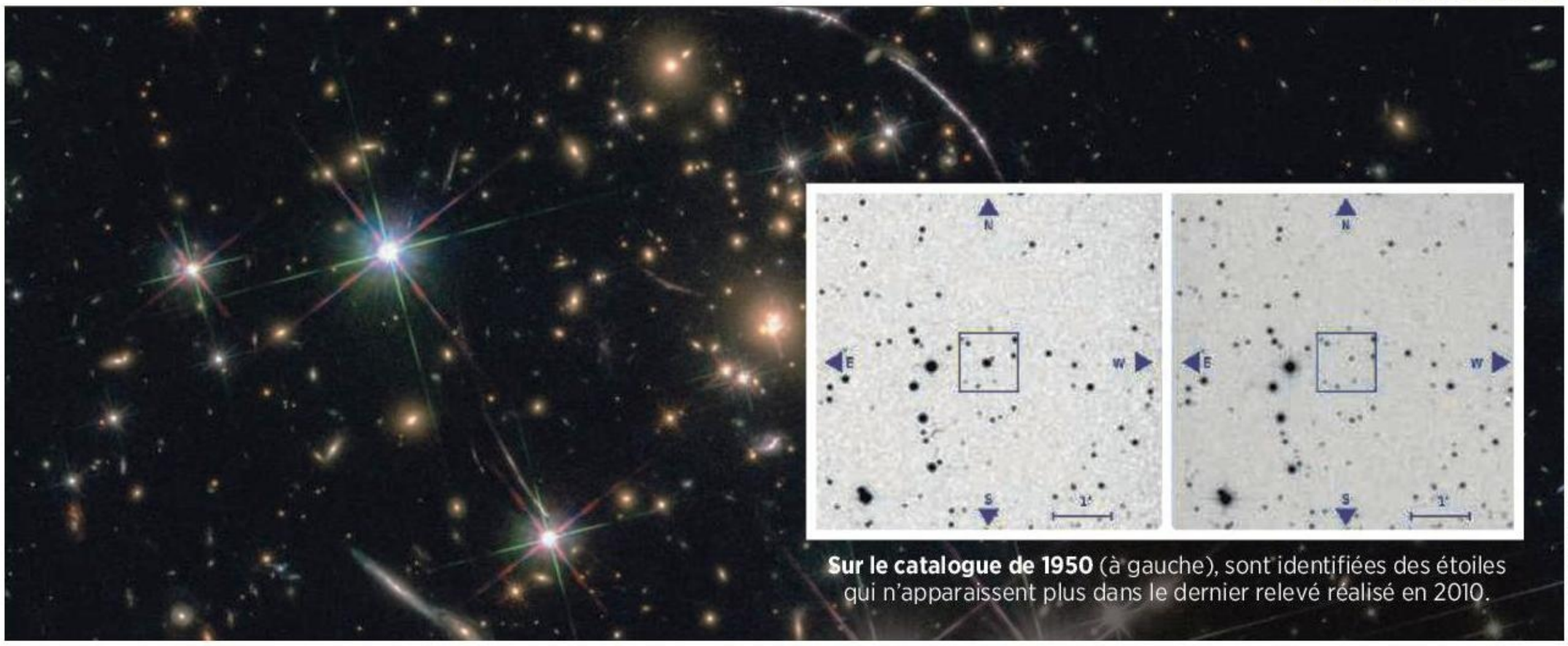
Un rover conçu pour forer jusqu'à 2 mètres

De la taille d'une voiturette de golf, le rover Rosalind-Franklin est l'élément clé de la mission européenne ExoMars. Alors que le rover Curiosity ou les atterrisseurs Phoenix et Viking, tous américains, n'ont pu creuser et analyser des échantillons qu'à 6 et 10 cm dans le sol de Mars, le rover de l'ESA a été conçu pour forer jusqu'à 2 mètres ! « *À cette profondeur, les roches sont préservées de l'atmosphère oxydante et surtout des rayons cosmiques qui pénètrent jusqu'à 1 mètre dans le sol et détruisent la matière organique,* explique André Debus, chef de projet des contributions françaises à ExoMars. *C'est là, par conséquent, que nous aurons les meilleures chances de trouver des signatures biochimiques et autres reliques d'une vie passée, si elles existent bien sûr.* » Testé à Toulouse sur le site d'Airbus, le rover utilisera une perceuse constituée de 4 forets de 50 cm. Les échantillons seront analysés par un spectromètre de masse fourni par la Nasa ou un microscope hyperspectral fabriqué par l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay. Quant aux sites de forage, ils seront déterminés, notamment, par un radar de pénétration du sol conçu par le Laboratoire atmosphères, milieux, observations spatiales (Latmos) en Île-de-Fance. « *Jusqu'ici, les radars sondant la surface de Mars ont toujours été installés sur des orbiteurs et non des rovers* », relève André Debus. Ce serait donc encore une première, si Rosalind-Franklin atterrit sans encombre sur la planète Rouge.

Un calendrier extrêmement serré

« *Cette solution semble être la bonne !* », s'enthousiasme François Spoto après qu'elle a été testée avec succès dans une installation du JPL, en décembre 2019 pour le parachute de 15 mètres et en janvier pour celui de 35 mètres. « *Nous sommes sur la bonne voie mais pas encore au paradis* », rappelle toutefois l'ingénieur. Si les expériences au sol se passent comme prévu, il faudra encore, en effet, valider le nouveau dispositif à haute altitude. Ces essais devraient se dérouler en février et en mars, dans l'Oregon (États-Unis). Un comité de l'ESA se réunira ensuite, en avril, pour passer en revue l'ensemble de la mission et donner son feu vert. Dans le cas contraire, le lancement sera reporté en 2022... « *Le calendrier est donc extrêmement serré,* souligne François Spoto. *Et nous n'avons plus le droit à l'erreur* », la priorité pour l'ESA étant d'éviter à tout prix un nouveau crash. ■

Franck Daninos @fdaninos



Sur le catalogue de 1950 (à gauche), sont identifiées des étoiles qui n'apparaissent plus dans le dernier relevé réalisé en 2010.

© ESA - VILLARROEL ET AL. (2019)

À la recherche des étoiles perdues

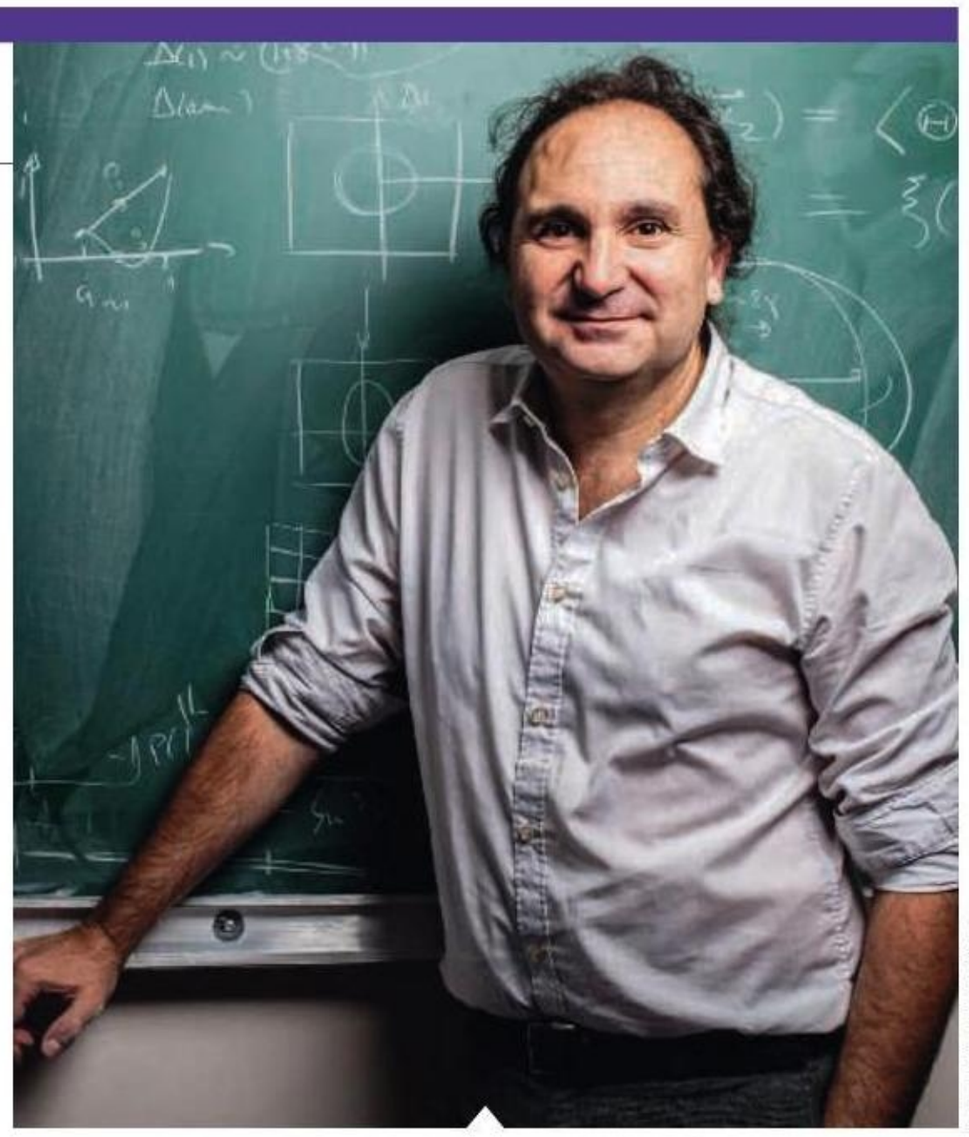
Comment expliquer que la carte du ciel de 1950 comptabilise plus d'astres que celle établie en 2010 ? Parmi les hypothèses examinées par les chercheurs : des explosions d'étoiles… voire des émissions extraterrestres !

En moins d'un siècle, 150 000 astres ont disparu ! C'est le constat surprenant d'une équipe internationale dirigée par Beatriz Villarroel, de l'Institut d'astrophysique des Canaries (Espagne). Un travail de fourmi : les chercheurs ont passé en revue 70 années de relevés du ciel, au sein du programme VASCO (Vanishing and Appearing Sources during a Century of Observations). L'équipe s'est essentiellement fondée sur un corpus de 600 millions d'étoiles présentes dans deux catalogues. Le plus ancien (USNO-B1) donne l'état du ciel en 1950 à partir de plaques photographiques ; le plus récent (Pan Starrs1) a été commencé en 2010 et recense déjà plus de 2 milliards d'astres. C'est ainsi que les scientifiques ont découvert que 150 000 astres présents dans le premier relevé manquaient à l'appel dans le second. Un constat pour le moins problématique car les étoiles ne disparaissent pas en quelques décennies. Certes, elles peuvent finir leur vie en explosant en supernova, mais c'est un phénomène très rare : entre une et trois par siècle dans la Voie lactée.

D'éventuels signaux éphémères par laser

Les chercheurs examinent quelques hypothèses dans leur article publié dans *Astronomical Journal*, comme d'autres formes rares et très discrètes d'explosion d'étoiles. Mais ils n'excluent pas des émissions extraterrestres ! Il pourrait par exemple s'agir de signaux éphémères de communication par laser entre d'éventuelles civilisations extraterrestres ou encore de l'effet d'une « sphère de Dyson », ainsi nommée d'après l'hypothèse émise en 1960 par le physicien anglo-américain Freeman Dyson : celle-ci suppose que les civilisations les plus avancées seraient à même d'élaborer une structure captant toute l'énergie de leur étoile qui, de ce fait, deviendrait indétectable.

Avant d'envisager une telle hypothèse, « *il faut d'abord souligner que tous les catalogues ont des défauts,* sourit François Mignard, de l'observatoire de la Côte-d'Azur. *Par ailleurs, certaines étoiles avaient peut-être des vitesses élevées et ont pu disparaître en 70 ans du cadre des observations. Mais cela n'explique pas qu'il puisse y en avoir 150 000.* » Le satellite européen Gaia, qui mesure à la fois la position et la vitesse des étoiles, pourrait d'ici à quelques mois apporter des informations. Par ailleurs, de nombreuses étoiles manquantes pourraient être « *des astres variables et éruptifs dont l'atmosphère devient très brillante de manière transitoire. Leur luminosité a pu diminuer au point de ne plus être détectée* », explique François Mignard. L'étude des étoiles variables suppose un suivi à long terme, d'où la décision de l'équipe de lancer un projet de science collaborative en demandant de l'aide aux passionnés d'astronomie. Et en faisant appel à un algorithme d'intelligence artificielle pour repérer, parmi toutes ces données, les étoiles perdues. ■ **Azar Khalatbari**



ROMAIN GAILLARD/REA

Directeur de recherche au CNRS, physicien et astrophysicien, spécialiste en cosmologie, Jean-Philippe Uzan interviendra en direct de Mexico pour la Nuit des idées, le 30 janvier.

JEAN-PHILIPPE UZAN
COSMOLOGISTE

« L'astronomie et le vivant sont liés »

À l'occasion de la manifestation « la Nuits des idées », dont *Sciences et Avenir* est partenaire, Jean-Philippe Uzan explique comment l'astronomie aide à réfléchir au vivant.

TOUTE UNE SOIRÉE ET UNE PARTIE DE LA NUIT pour se ressourcer ! la Nuit des idées 2020, organisée ce 30 janvier par l'Institut Français autour du thème « Être Vivant » se déroulera dans de nombreuses villes sur les cinq continents et proposera conférences, animations, performances, tables rondes. Jean-Philippe Uzan, cosmologiste à l'Institut d'astrophysique de Paris interviendra depuis le Museo universitario del Chopo à Mexico, Mexique.

Quel rapport entre l'astronomie et le vivant ?
En tant que physicien, j'étudie effectivement plutôt l'inerte. Mais l'astronomie est riche en enseignements pour réfléchir au vivant. La cosmologie nous apprend ainsi que ce que nous appelons le « vivant » n'a pas toujours existé. Nous savons que l'Univers des premiers temps était trop chaud pour accueillir la vie et que dans un futur lointain, il fera trop froid pour que perdurent les conditions indispensables à la conservation de celle-ci. Le fait qu'elle n'ait pu éclore que durant un court laps de temps a des implications philosophiques et métaphysiques.

PARTENARIAT SCIENCES AVENIR

La Nuit des idées
organisée ce 30 janvier. Voir la programmation sur le site : **www.lanuitdesidees.com**

▸ Retrouvez l'interview complète sur notre site : **sciav.fr/876Uzan**

La découverte d'exoplanètes donne-t-elle l'espoir de découvrir d'autres formes de vie ?
Comme l'indiquent les observations astrophysiques, la Terre est à ce jour la seule planète qui porte la vie. Depuis 1995 et la découverte des premières exoplanètes, nous constatons que certaines d'entre elles rassemblent des conditions favorables à la vie. Pour l'instant, nos efforts pour la dénicher sont restés vains. Par ailleurs, au cours des siècles, grâce à l'observation, nous avons tissé une relation particulière avec le firmament : le ciel est devenu le miroir de nos rêves, nous y avons projeté des dieux qui ont alimenté des histoires. Cela a façonné notre imaginaire de mille manières. Le ciel des Mayas n'est pas le même que celui des Grecs. Or, aujourd'hui nous sommes en train de perdre notre connexion avec le ciel en raison de la pollution lumineuse qui fait disparaître le noir de la nuit. Nous n'avons pas su préserver ce paysage comme de nombreux autres — fleuves, montagnes, rivages.
Le caractère fini de la planète nous oblige à repenser notre rapport au monde. Je suis très sensible à la philosophie de l'Américaine Donna Haraway, professeure émérite à l'université de Santa Cruz, qui propose des liens d'interdépendance avec l'inerte, l'animal et le végétal. Cela suppose d'y apporter soin et entretien à la manière d'un lien de parenté revisité.

Quelle serait votre définition du vivant ?
Une définition possible serait : « *Est vivant ce qui se modifie au cours du temps et n'est jamais figé dans une forme.* » Selon la théorie de l'évolution, un des mécanismes du vivant est l'hybridation qui suppose échange entre individus, espèces, écosystèmes et civilisations. Aucun n'est étanche et immuable. Nous devons inventer une nouvelle relation au monde à transmettre aux générations futures grâce à la seule ressource infinie dont nous disposons : la connaissance. Son partage n'appauvrit pas la personne qui la transmet et enrichit celle qui la reçoit. Elle croît en se propageant. ■

Propos recueillis par Azar Kalatbari

MYSTÉRIEUSE BIRMANIE

Mandalay, golfe du Bengale, temples de Bagan... il y a des noms qui font instantanément rêver. Sans même évoquer la vallée des rubis, célèbre titre de Joseph Kessel, aussi bien journaliste qu'aventurier qui raconta les richesses de Mogok, ville toute empreinte de légendes.

Le voyage proposé aujourd'hui au Myanmar par Sciences et Avenir invite à la découverte de ce pays mieux connu de beaucoup sous le nom de Birmanie, qui paraît toujours aussi mystérieux.

Parce qu'il est synonyme de pierres précieuses - aussi bien saphirs que rubis ! - de jade et autres pierres fines, il nous fallait, pour le décrypter, un spécialiste incontestable du domaine. Ce sera le cas, avec Didier Giard, membre de l'Académie des Sciences d'Outre-Mer et Président de l'Association Française de Gemmologie, fin connaisseur de géopolitique, qui replacera pour nous l'importance du pays dans l'Asean (association des nations de l'Asie du sud-est) et sur les nouvelles routes de la Soie. Ce sont à la fois la découverte de sites somptueux et la compréhension du monde d'aujourd'hui qui vous sont proposées. Un merveilleux voyage en perspective.

Dr Dominique LEGLU
Directrice de la rédaction de Sciences et Avenir

AVEC VOUS À BORD !
DIDIER GIARD
Conférencier

Didier Giard est membre titulaire de l'Académie des Sciences d'Outre-Mer où il occupe le siège de l'ancien ambassadeur André Lewin et est membre de la prestigieuse Société des Explorateurs Français crée en 1937 par Paul-Emile Victor.

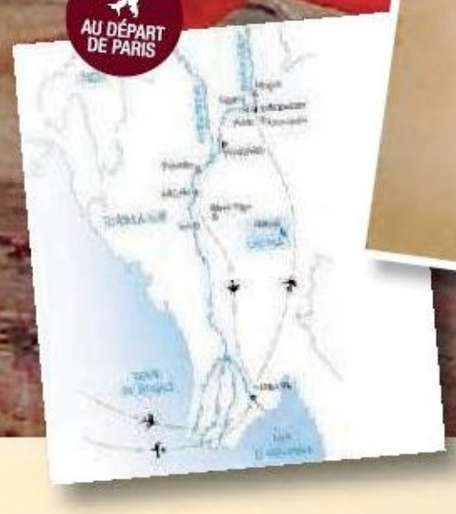
Concept : www.pascale-m.com - Crédits photos : Wikimédia / Michael Gunther CC BY-SA 4.0 - Pixabay-CC0

LES EXPÉDITIONS SCIENCES ET AVENIR

CROISIÈRE EN BIRMANIE

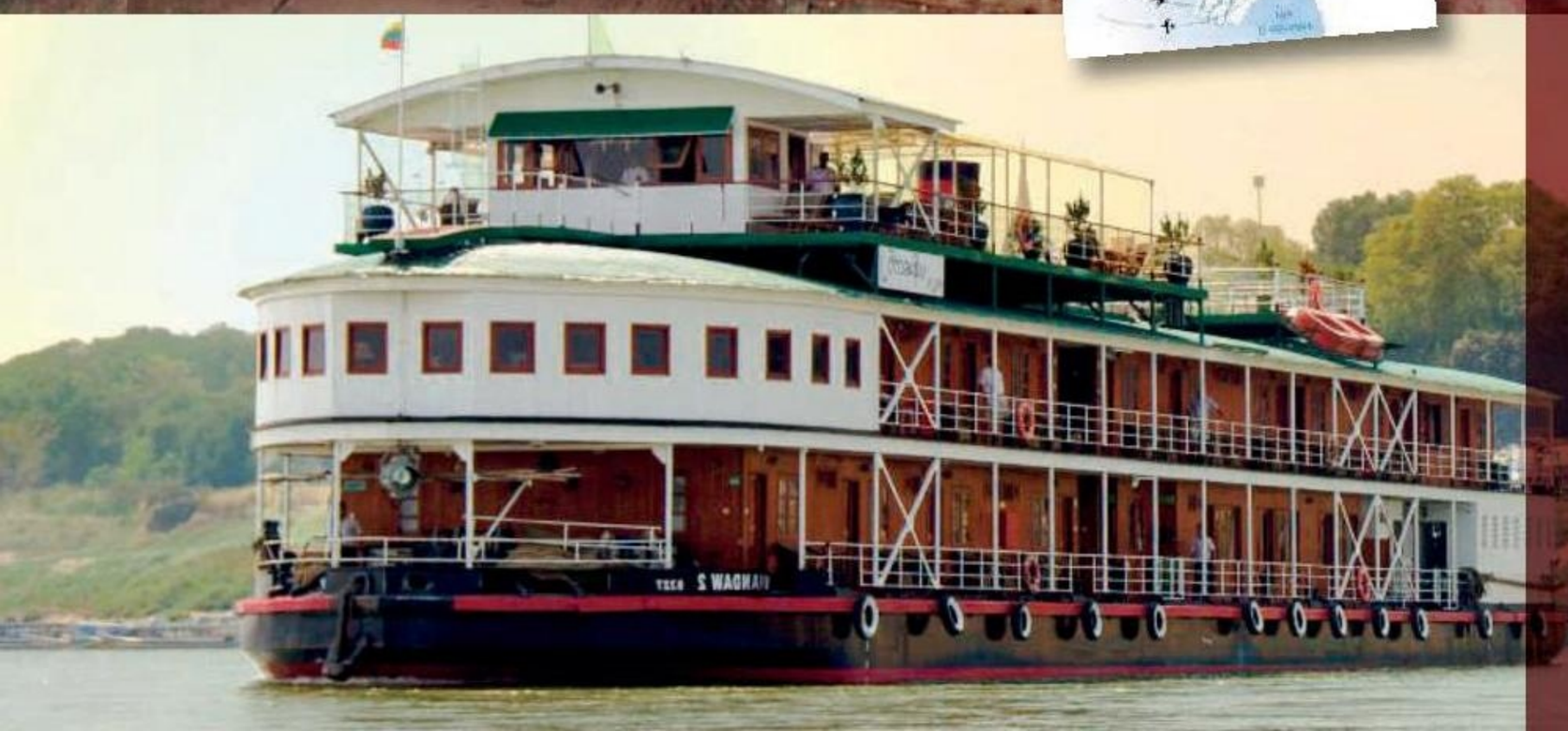
FESTIVAL DU PHAUNG DAW OO AU LAC INLE

14 JOURS / 11 NUITS
DU 14 AU 27 OCT. 2020
A BORD DU PANDAW II



LES POINTS FORTS

~ UN CONFÉRENCIER DE TRÈS HAUT NIVEAU SPÉCIALISTE DE LA BIRMANIE.
~ LES VISITES DES PLUS BEAUX SITES DE LA BIRMANIE.
~ UNE DES MEILLEURES PÉRIODES DE L'ANNÉE.
~ LE GRAND MOMENT DE VOTRE CROISIÈRE, LE FESTIVAL DES BATEAUX PAGODES SUR LE LAC INLE, C'EST L'UN DES PLUS BEAUX SPECTACLES AQUATIQUES D'ASIE DU SUD-EST.
~ UN PETIT PAQUEBOT CONVIVIAL DE 20 CABINES POUR 40 PRIVILÉGIÉS.
~ UN TOUT COMPRIS BLEU VOYAGES (excursions, boissons à table, etc...).
~ UN ACCOMPAGNEMENT FRANCOPHONE.



À PARTIR DE
3 700 €/PERS.
Au départ de Paris - En tout inclus

RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS :
BLEU VOYAGES
213 rue de Gerland - Bat 2 - 69007 LYON
TÉL. 04 72 76 75 66
www.expeditions-sciencesetavenir.fr

Bleu Voyages

Neige et Soleil Voyages SAS au capital de 396 800 • RC Bourgoin Jallieu B 398 629 766 • Code APE 7911 Z • Immatriculation Atout France 038110038 • Agence garantie par l'APST • 15 Avenue Carnot - 75017 Paris • Agence assurée pour sa responsabilité civile et professionnelle par le groupe MMA Entreprises n° de contrat 144569079.

Kunara, rivale des cités de Mésopotamie

Des chercheurs français ont mis au jour au Kurdistan irakien une ville de l'âge du bronze vieille de 4000 ans. Ce serait la capitale du royaume des Lullubi, célèbre pour figurer sur la stèle des Victoires exposée au musée du Louvre, à Paris.

Par Bernadette Arnaud, envoyée spéciale NarudaaArnaud

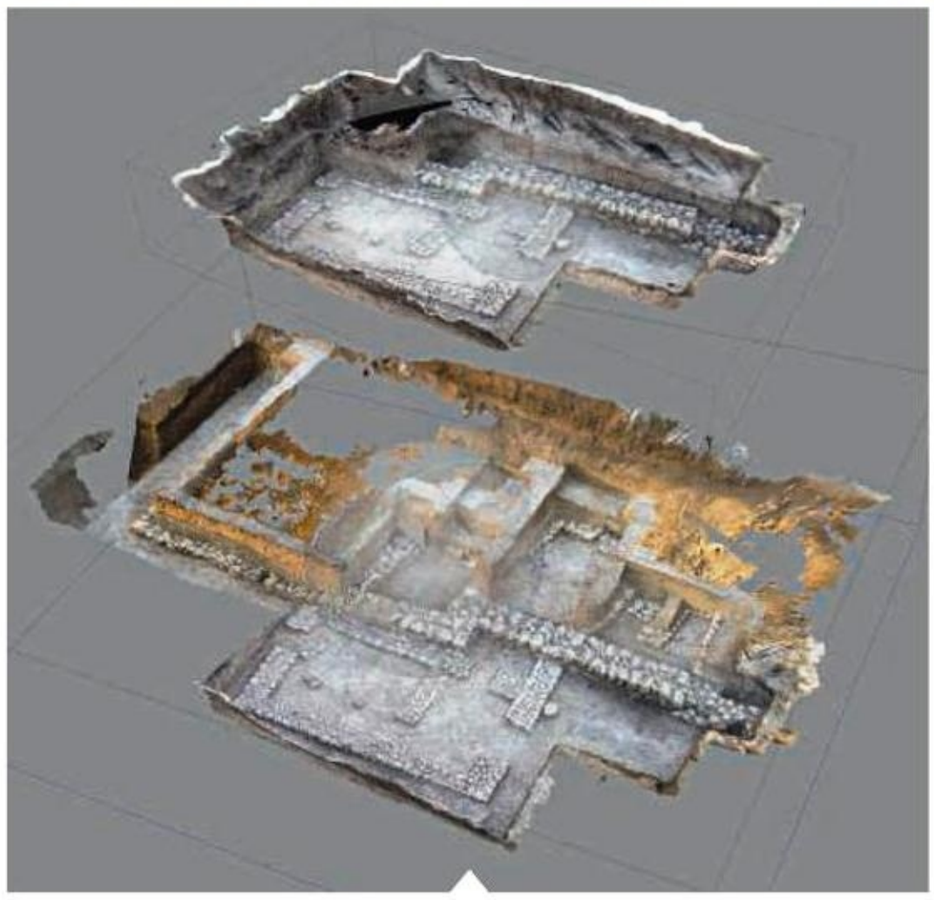
BERNADETTE ARNAUD - BRUNO BOURGEOIS

UN SOLEIL BLANC ÉCLAIRE CETTE PLAINE habituellement désertique, que l'abondance des pluies de printemps a pourtant mise en herbe. Des ouvriers arabes et kurdes s'activent, chaque groupe à une extrémité des dix hectares du chantier archéologique de Kunara situé dans le Kurdistan irakien, à 5 kilomètres de Suleymaniyeh, cité dynamique de 2 millions habitants. Les deux communautés présentes sur ce site du IIIe millénaire avant notre ère restent distantes en raison de leurs langues différentes et des conflits qui les ont opposés... mais Madjit, Ayman ou Omar communiquent parfois par d'étranges biais avec Reband, Raouch ou Reken : « *Le dernier échange en date portait sur le fait de savoir quel club de foot ils allaient soutenir, du Real Madrid ou du FC Barcelone!* », explique Aline Tenu, archéologue au CNRS (UMR 7041 ArScAn, équipe Histoire et archéologie de l'Orient cunéiforme, Paris) et directrice de la mission du Peramagron, un temps inquiète d'une telle association. « *En fait, tout se passe au mieux. En outre, ils apprécient de travailler avec la France, pays vainqueur de la dernière coupe du monde!* » Ainsi, entre Euphrate et Tigre, parmi les ruines en cours d'exhumation, le ballon rond est un sujet de cohésion dans cette région où la minorité kurde, composée de musulmans sunnites (90 %), de yézidis (5 %) et de quelques chrétiens nestoriens, a connu d'innombrables tragédies. Longtemps interdite d'accès sous la dictature de Saddam Hussein, cette zone — devenue autonome en 2005 — focalise désormais l'attention des spécialistes qui s'étaient jusqu'alors concentrés sur d'autres régions d'Irak ou la Syrie. Allemands, Anglais, Danois, Hongrois, Italiens et Japonais se croisent dans ce nouvel eldorado de l'archéologie. Sans oublier les Français qui, dès 2011, ont répondu à la demande du service des Antiqui- ▶

CONTEXTE

Du IVe au Ier millénaire avant notre ère d'imposantes cités ont vu le jour dans la plaine située entre le Tigre et l'Euphrate. De cités-États, elles sont devenues peu à peu des empires. Le premier est celui d'Akkad fondé par Sargon (2334-2279 avant J.-C.), avant l'unification de la Mésopotamie par son petit-fils Narâm-Sîn (2254-2218 avant J.-C.). Vinrent ensuite les empires assyrien d'Assurbanipal (668-627 avant J.-C.) et babylonien de Nabuchodonosor II (605-562 avant J.-C.).

De larges soubassements en pierre portant des structures de brique crue ou de pisé ont été mis au jour par les archéologues. Ces techniques de construction sont uniques pour le IIIe millénaire avant J.-C.



Les fouilles se concentrent aujourd'hui sur la ville basse, où un imposant bâtiment est en train d'être dégagé (ici reconstitution 3D des murs).

La première tablette cunéiforme découverte à Kunara est un texte administratif enregistrant les livraisons de différents types de farines. Cela atteste l'importance de Kunara, cité dotée d'une administration élaborée.

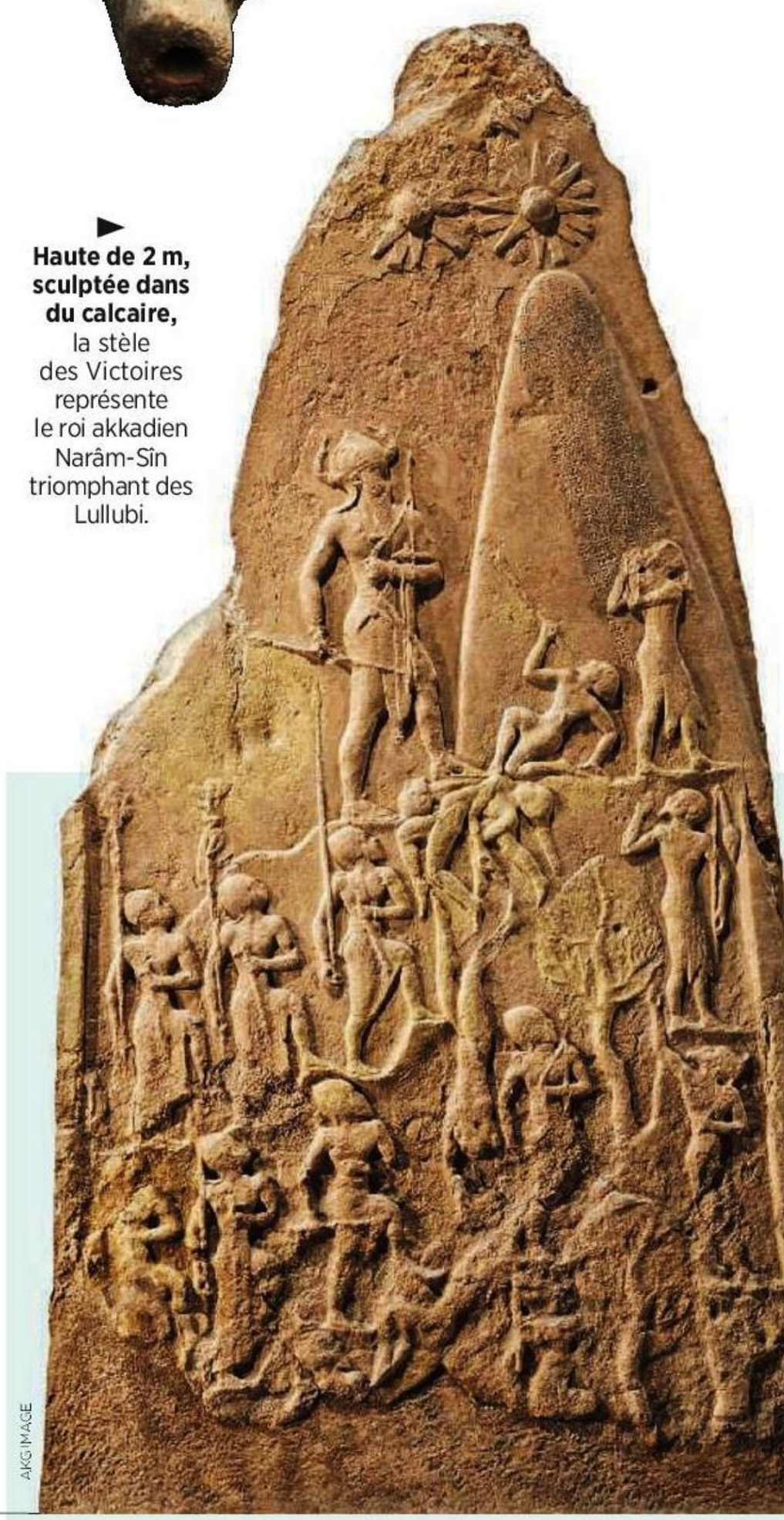
PHOTOS : A. TENU/ MISSION ARCHÉOLOGIQUE FRANÇAISE DU PERAMAGRON

tés de Suleymaniyeh — antenne de la Direction des antiquités générales du Kurdistan d'Erbil — pour constituer une carte archéologique de cette zone vierge de toute recherche. Ce à quoi s'est aussitôt attelée une équipe alors dirigée par Christine Kepinski (CNRS). Avec des résultats qui dépassent aujourd'hui toutes les espérances puisque la cité exhumée apparaît comme un puissant centre politique à l'instar de ses voisines de Mari (Syrie), Ur, Uruk ou Babylone. Elle s'agirait de la capitale du Lullubum (ou Lulluban), le royaume des Lullubi, célèbre pour figurer sur la stèle des Victoires (2254-2218 avant J.-C.), exposée au Louvre à Paris *(lire l'encadré p. 55)*.

D'imposants bâtiments surgissent peu à peu du sol

« Nous savions par des textes mésopotamiens remontant au IIIe millénaire avant notre ère que cette province située en bordure du pays d'Akkad, au nord de Sumer, était une plaine cultivable très prospère, raconte Aline Tenu. *Elle était d'autant plus convoitée que les routes qui la traversaient menaient vers l'Asie centrale.* » Une richesse que les archéologues mettent peu à peu au jour. *« Kunara s'est révélée beaucoup plus importante qu'on ne l'imaginait ! Presque dix ans après avoir commencé les fouilles — et après une période d'interruption due au terrorisme — nous sommes encore loin d'avoir terminé ! »*, poursuit la spécialiste. À l'été 2014, les archéologues ont en effet dû quitter les lieux précipitamment après que le conseiller sécurité du CNRS a annulé la mission. La ville d'Erbil, à une heure de route, venait en effet de subir une offensive djihadiste. Cécile Verdelet, rattachée à l'ArScAn (UMR 7041), alors en poste sur place, se souvient : *« Les combattants du groupe État islamique avaient atteint les portes de la ville. Nous avons été sauvés in extremis par un bombardement des forces de la coalition internationale. »* Un an plus tard, le calme rétabli, les chercheurs ont pu revenir travailler dans cette zone. C'est ainsi que sous les températures caniculaires de ce mois de septembre 2019, chacun s'emploie à extraire du sol les restes de murs de ce qui fut une maison ou un édifice public. D'imposants bâtiments surgissent peu à peu du sol. Florine Marchand, archéologue à l'Université libre de Bruxelles (Belgique), l'Italienne Barbara Chiti, spécialiste des urbanismes sumériens rattachée à l'ArScan, et Cécile Verdelet à qui aucun tesson de céramique ne résiste, portent actuellement leurs efforts sur la ville basse. Dès l'aube, elles commencent leurs travaux quand le chant des muezzins des mosquées alentour résonne encore. *« Nous sommes en train de mettre au jour ce qui fut certainement un palais de 40 mètres de long et 25 m de large,* explique Aline Tenu. *Ses murs font 2,80 m d'épaisseur*

Les tessons de céramique retrouvés sur le site sont ornés d'animaux (ci-dessus, scorpion et serpents, ci-contre, un bec-verseur en forme de tête de bélier).



Haute de 2 m, sculptée dans du calcaire, la stèle des Victoires représente le roi akkadien Narâm-Sîn triomphant des Lullubi.

AKG IMAGE

URBANISME

L'émergence des cités

Les villes sont nées à la fin du IVe millénaire dans le sud de la Mésopotamie, le berceau de la civilisation. Il y a quelques années encore, les chercheurs pensaient que ce modèle s'était diffusé au Nord et en Syrie. Or les études ont montré que l'essor des cités s'est joué de façon autonome et selon des critères autochtones, plusieurs foyers d'urbanisation s'étant ainsi développés à des rythmes différents. En Mésopotamie du sud, à partir de la fin du IVe millénaire, et en Syrie et Mésopotamie du Nord, à partir du début du IIIe millénaire. Avant que les villes n'émergent un peu partout au Proche-Orient vers 2400-2500 avant J.-C.

comme ceux que nous avons découverts dans un autre bâtiment de la ville haute. » Serait-ce le palais de l'*ensi* (roi) mentionné sur un document découvert en 2018 ? Car les archéologues ont exhumé 116 tablettes et fragments de tablette couverts de signes cunéiformes — l'écriture des peuples mésopotamiens. La plupart ont subi un incendie — sans doute dû à une offensive militaire — qui a ravagé la cité en 2100 avant notre ère et dont les spécialistes voient encore la trace dans les fondations. Analysés par les épigraphistes Philippe Clancier et Justin Monerie, de l'université Paris-I, et Grégory Chambon, de l'école des hautes études en sciences sociales (EHESS), ces textes lèvent un peu le voile sur l'histoire des Lullubi. « *Ces tablettes comportent notamment les entrées et sorties de différents types de farines*, précise l'archéologue. *D'autres ont révélé l'usage d'une unité de mesure méconnue, le gur du Subartu, alors qu'à l'époque c'était le gur d'Akkad* [équivalent à 300 litres] *qui était employé dans tout l'empire mésopotamien* ». Preuve, pour l'orientaliste, de l'importance de Kunara. Le site a aussi livré de menus objets en bronze et d'importantes quantités de tessons de céramique, de vestiges de jarres et de récipients aux fonctions probablement rituelles. Sur certains des pots fragmentés apparaissent encore de délicats décors de scorpions, serpents ou buffles. « *De grandes quantités d'ossements animaux ont aussi été exhumées*, précise Michael Seigle, doctorant en archéozoologie à l'HiSoMA (UMR 5189). *On y retrouve la triade bœuf, cochon, chèvre/mouton, mais aussi des os de lièvre et de chien dont l'analyse montre qu'ils ont été consommés.* » Des restes de poules — les plus anciennes connues en dehors de l'Asie du Sud-Est d'où l'espèce est originaire — et d'équidés ont également été retrouvés. Ces derniers venaient à peine d'être d'introduits en Mésopotamie. « *La faune sauvage n'est pas en reste !* », poursuit Michael Seigle. Car les souverains de Lullubum — comme tous les souverains de la Mésopotamie voisine — devaient apprécier l'exhibition d'animaux comme les ours et les lions dont des ossements ont été collectés. « *À Assur, la capitale de l'Assyrie, beaucoup de fauves étaient maintenus en captivité. Nous possédons même des tablettes faisant le compte du nombre d'agneaux nécessaires pour nourrir les lionceaux !* », ajoute le chercheur.

ALINE TENU

« Nous sommes en train de mettre au jour ce qui fut certainement un palais de 40 m de long et 25 de large »

Aline Tenu, archéologue CNRS (UMR 7041 ArScAn), directrice de la mission du Peramagron au Kurdistan irakien

Des aménagements pour la circulation des eaux

Surtout, les archéologues s'interrogent sur l'architecture inédite de la cité. « *Les techniques de construction rencontrées sur ce site sont uniques* », explique Barbara Chiti : « *En tant que spécialistes de la Mésopotamie, nous pensions trouver au Kurdistan des constructions en brique crue identiques à celles de la Syrie voisine. Or ce n'est pas le cas.* » Les chercheurs se retrouvent ainsi face à des soubassements en pierre portant des superstructures de brique crue (parallélépipède d'argile séché au soleil) mais aussi de pisé (terre crue tassée entre des planches). Les murs ayant parfois plus de 1,60 m d'épaisseur ! « *Cela ne ressemble à rien de ce que l'on connaît au IIIe millénaire*, poursuit l'experte. *Kunara est un nouvel exemple d'urbanisme. Nous allons devoir décrypter cette cité structurée en différents quartiers dans lesquels sont érigés des bâtiments publics monumentaux et où courent des aménagements pour la circulation des eaux.* » À ce jour, seul un dixième du site de Kunara a été étudié. Beaucoup reste donc à découvrir. De quoi changer la vision de l'histoire mésopotamienne. ■

A. TENU / MISSION ARCHÉOLOGIQUE FRANÇAISE DU PERAMAGRON - AKG IMAGES

CONQUÊTE

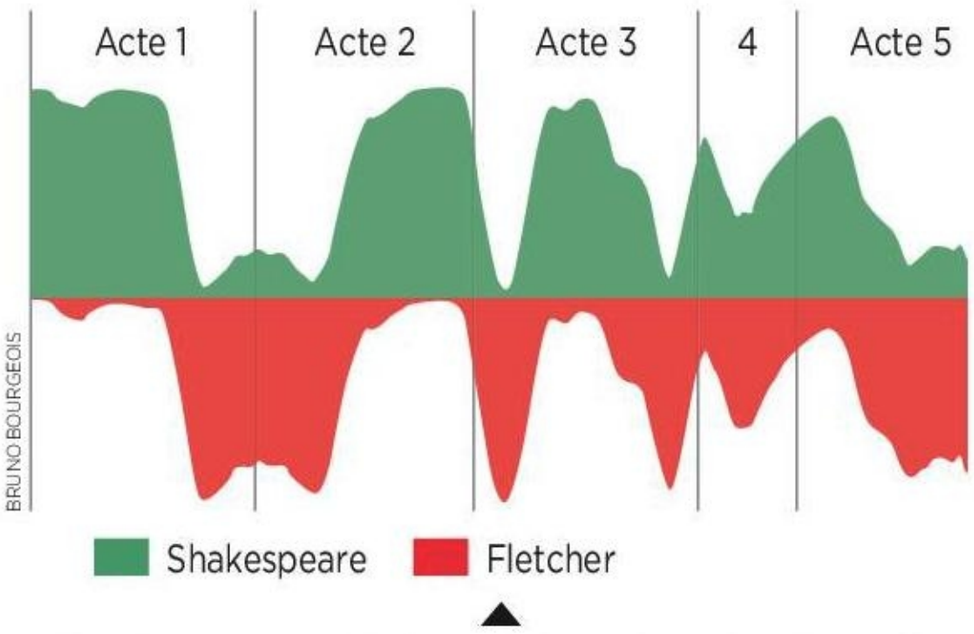
La stèle de Narâm-Sîn

Cette œuvre majeure (*photo ci-contre*) célèbre la victoire du roi mésopotamien Narâm-Sîn (2254-2218 avant J.-C.) sur un peuple rebelle des monts Zagros (chaîne s'étendant de l'ouest de l'Iran au sud-est de la Turquie en passant par le Kurdistan irakien), les Lullubi, dont les archéologues sont en train de mettre au jour la capitale. L'ambitieux monarque, probable petit-fils du grand Sargon d'Akkad (2234-2279 avant J.-C.), y est représenté avec son armée, piétinant le roi Satuni et ses soldats vaincus. Narâm-Sîn arbore une tiare à cornes, coiffe des dieux dans le monde mésopotamien. Son nom est précédé du déterminatif divin (*dangir*) représenté par une étoile. Plus tard, au tournant du IIe millénaire avant notre ère, d'autres souverains prétendront aussi à cette divinisation. Découverte à Suse, capitale des Élamites (actuel Iran), par le Français Jacques de Morgan en 1898, la stèle des Victoires a probablement été pillée à Akkad par les Élamites au XIIe siècle avant notre ère. Des bas-reliefs royaux s'inspirant de cette même scène célébrant l'image d'un roi puissant et victorieux ont depuis été retrouvés sur les falaises de Darband-I-Gawr, non loin de Kunara.

Qui a écrit quoi ? la preuve par l'algorithme

L'intelligence artificielle se révèle une aide précieuse dans l'attribution de la paternité d'une œuvre, avec un degré de précision inédit. Exemple avec « Henry VIII », pièce controversée de Shakespeare, et aussi le débat Molière/Corneille.

« D'AUTANT PLUS BLANCHE ET PLUS PURE *apparaîtra mon innocence, quand le roi connaîtra ma loyauté.* » Ainsi s'adresse le cardinal Wolsey au comte de Surrey dans la scène 2 de l'acte III de la pièce *Henry VIII* de William Shakespeare (1564-1616). Or justement, à partir de cette 2200e ligne, l'œuvre ne serait plus exactement du célèbre dramaturge anglais… mais de son compatriote John Fletcher (1579-1625). Dans un article paru à l'automne 2019, Petr Plecháč, chercheur en littérature de l'Académie tchèque des sciences, explique comment il a utilisé un algorithme dit d'apprentissage automatique pour confirmer et affiner une hypothèse remontant aux travaux du Britannique James Spedding en 1850 : Henry VIII est une collaboration entre les deux dramaturges. En revanche, Philip Massinger (1583-1640) ne serait pas intervenu, contrairement à ce qu'avançait un autre exégète littéraire. Surtout, la méthode a permis de déterminer — à la ligne près — les passages du texte où Shakespeare a passé le relais à Fletcher et inversement. De quoi clarifier des recherches remontant à plus d'un siècle et ouvrir des pistes pour l'analyse des textes à l'avenir.



Répartition des contributions des deux auteurs de « Henry VIII » calculée par un algorithme d'apprentissage automatique.

Pour permettre à l'algorithme d'établir des comparaisons, Petr Plecháč a commencé par extraire — sans l'aide de l'intelligence artificielle (IA) — les 500 mots et les 500 motifs rythmiques (accentuations de syllabes) les plus fréquemment utilisés dans 189 scènes tirées de quatre autres pièces de Shakespeare, quatre de Fletcher et trois de Massinger. Ce corpus a permis à l'algorithme de s'entraîner à reconnaître le style de chacun des trois auteurs. Puis le chercheur a passé le texte de *Henry VIII* au filtre des trois modèles stylistiques établis, en sélectionnant dans chacun des cinq actes une trentaine de passages dans chaque scène. Résultat : James Spedding avait vu juste, Shakespeare et Fletcher ont bien travaillé de concert, l'algorithme attribuant cependant deux scènes complètes au seul dramaturge de Stratford-upon-Avon. En outre, Petr Plecháč réussit à montrer que les deux auteurs ne se sont pas simplement réparti des scènes à écrire. L'acte IV relèverait d'un travail commun des deux plumes, ligne à ligne.

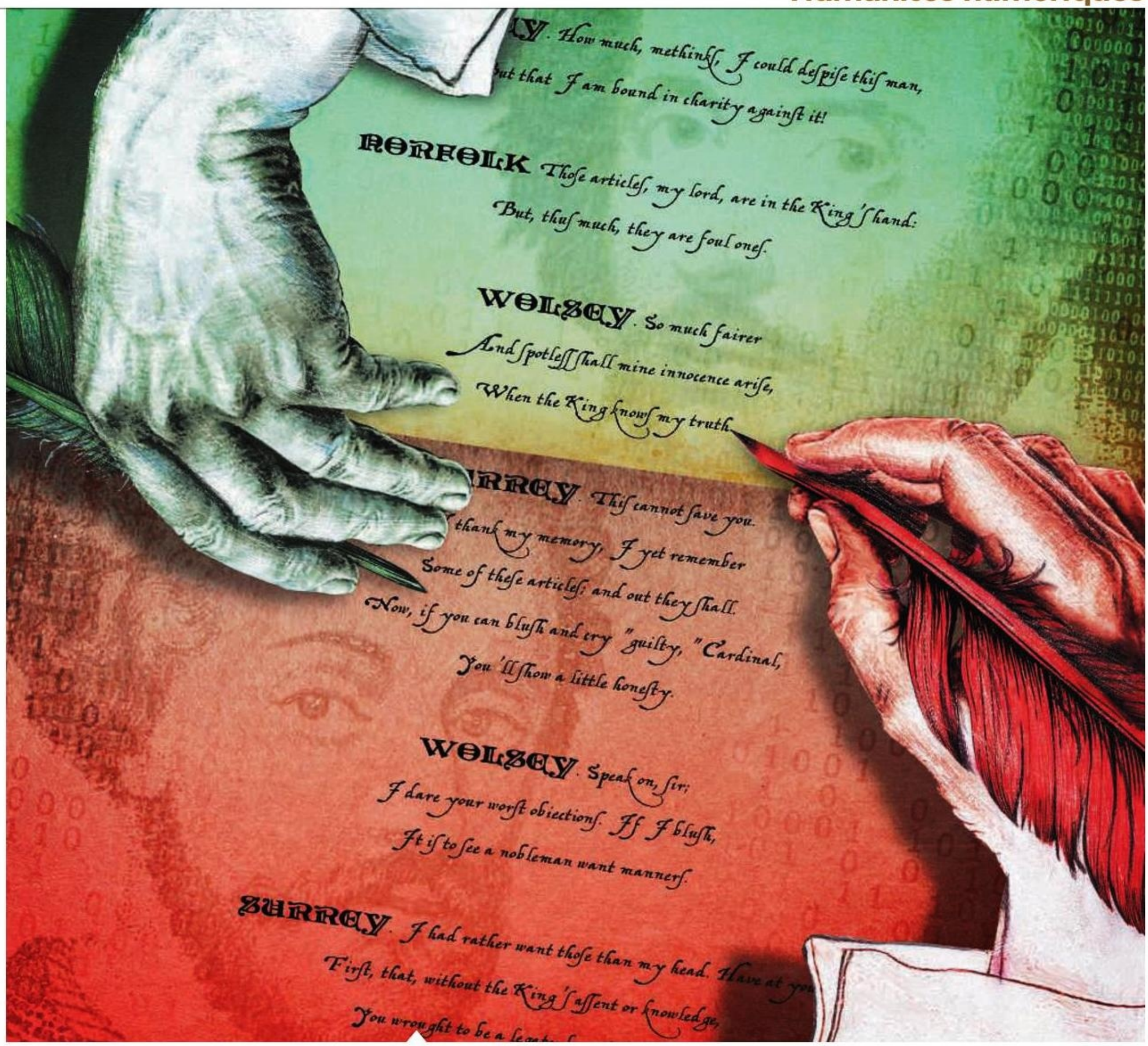
Automatiser des tâches fastidieuses

« Lorsque j'ai commencé à travailler sur ces problèmes d'attribution de textes, nous utilisions un procédé mathématique appelé "chaîne de Markov". Aujourd'hui, les algorithmes d'apprentissage en sont une évolution logique », estime Dominique Stutzmann, spécialiste en histoire de l'écriture à l'Institut de recherche et d'histoire des textes (IRHT) du CNRS, qui utilise l'intelligence artificielle pour décrypter des textes médiévaux (*voir* S. et A. *n° 868*). Ces techniques sont encore peu sollicitées. *« Il y a beaucoup d'articles théoriques sur la manière d'utiliser efficacement l'IA, mais il existe encore peu*

F. CAFIERO

« Il y a beaucoup d'articles théoriques sur la façon d'utiliser efficacement l'IA, mais il existe peu de cas appliqués »

Florian Cafiero, ingénieur en mathématiques appliquées à l'université Paris-Diderot et spécialiste en humanités numériques



La pièce « Henry VIII » est une collaboration entre William Shakespeare (en haut) et John Fletcher (en bas).

de cas appliqués », confirme Florian Cafiero, ingénieur en mathématiques appliquées au CNRS et spécialiste en humanités numériques. Fin novembre 2019, avec Jean-Baptiste Camps, maître de conférences à l'École nationale des chartes, il a signé un article de recherche réfutant la thèse « coriace » selon laquelle le dramaturge Pierre Corneille (1606-1684) aurait écrit les pièces de Molière (1622-1673). Une thèse avancée par l'écrivain français Pierre Louÿs en 1919 et soutenue depuis par divers travaux. Mais dans ce travail, l'IA a servi d'une manière différente de celle de Petr Plecháč. « *Nous avons utilisé l'apprentissage automatique pour la préparation du corpus de textes, consistant à repérer les natures grammaticales : noms communs, noms propres, adverbes, adjectifs qualificatifs, verbes conjugués, verbes à l'infinitif...* », explique Florian Cafiero. Les chercheurs ont entraîné un « réseau de neurones convolutionnels » (*deep learning*) sur des comédies en vers du XVI^e^ siècle, afin d'avoir un corpus homogène. Cela afin de réussir l'étape indispensable de la « lemmanisation » qui consiste à regrouper des formes occurrentes en revenant à leur racine commune : « *L'IA est capable de repérer, par exemple, que les formes "ayez" ou "aurez" correspondent toutes deux au verbe "avoir"* », poursuit l'expert. L'analyse a ensuite consisté en une comparaison de caractéristiques telles que les rimes, le lexique, la morphosyntaxe, ainsi que l'utilisation de « mots-outils » *a priori* anodins (et, des, ou, cela, voilà...) mais dont l'emploi est propre à chaque auteur.

Résultat : pas la moindre trace de la plume de Corneille dans l'œuvre ▸

MUSIQUE

Lennon et McCartney passés au crible d'un modèle statistique

Pourtant bien documenté, le processus créatif de John Lennon et Paul McCartney souffre encore de zones d'ombre. Les auteurs-compositeurs principaux des Beatles, qui cosignaient toutes leurs chansons, n'ont jamais été d'accord sur certaines de leurs collaborations comme *Eleanor Rigby* ou *In my Life*. Pour résoudre l'énigme sur le plan musical, deux chercheurs canadien et américain ont isolé 149 caractéristiques (accords, enchaînement de notes...). Puis, se fondant sur 70 chansons pour lesquelles il n'existe aucune ambiguïté, ils ont entraîné un algorithme à reconnaître le style de chacun des deux musiciens. Ces modèles ont alors été confrontés aux œuvres faisant débat, pour fournir un score de probabilité que l'un ou l'autre en soit l'auteur (entre 0 et 1). Résultat : des titres connus pour être très « McCartney » — comme *And I Love Her* — porteraient pourtant la marque de Lennon. Et inversement avec *The Word*. L'exercice reste toutefois délicat. « *En musique, il est très difficile de trouver des constructions analogues au texte*, explique l'un des coauteurs de l'étude Mark Glickman, maître de conférences en statistiques à l'université Havard (États-Unis). *Les notes prises isolément ne suffisent pas car plusieurs sont jouées en même temps dans un morceau.* » De plus, « *il est tout fait possible que McCartney ait écrit le pont de* And I Love Her... *dans le style de Lennon.* »

de Molière. Si les chercheurs n'ont pas procédé comme le chercheur tchèque ils l'ont envisagé. Mais le sujet Molière/Corneille est sensible. « *Sur un terrain moins miné, l'utilisation de l'IA aurait été une option tout à fait défendable. Mais nous savions que la démarche nous aurait été reprochée car certains auraient contesté le choix de telle ou telle pièce dans le corpus d'entraînement* », confirme Florian Cafiero. En revanche, pour montrer la viabilité de l'emploi des algorithmes, les chercheurs utilisent la même méthode que Petr Plecháč pour *Henry VIII* dans une étude à venir sur la tragédie-ballet *Psyché* (1671). Commandée par Louis XIV, cette pièce est une collaboration avérée entre Molière, Pierre Corneille et Philippe Quinault. En construisant ses modèles, l'algorithme sera à même d'ici à quelques mois de déterminer précisément les passages écrits par chacun.

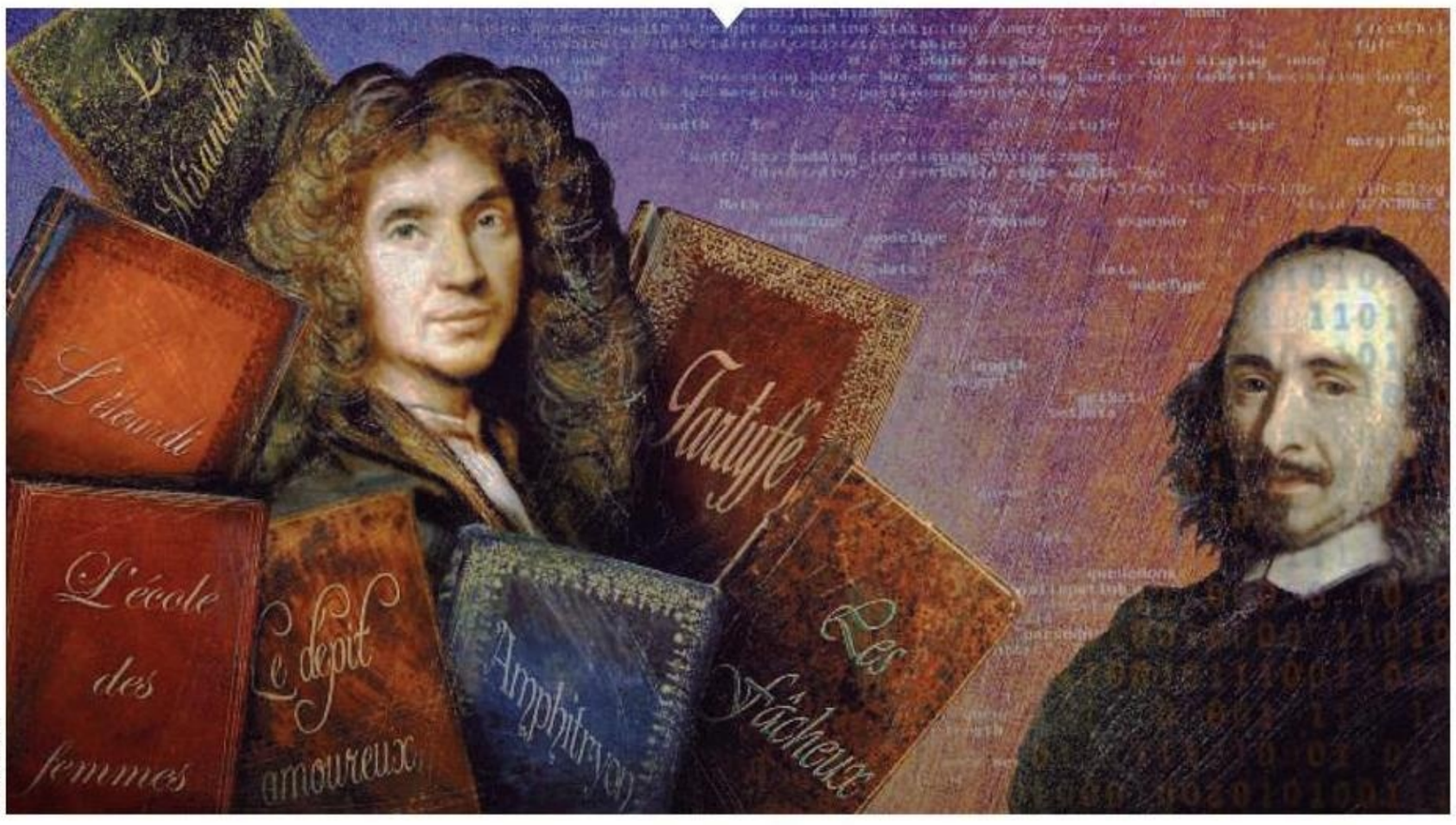
Avec sa capacité à traiter d'énormes volumes de données, l'apprentissage automatique ne s'arrête pas aux polémiques littéraires. D'autres applications sont d'ores et déjà envisageables. Par exemple pour les textes médiévaux anonymes. En fonction de ses intuitions et de son expertise, un chercheur peut bâtir un modèle d'apprentissage à partir du corpus de tel ou tel auteur et y confronter un texte. « *On ne pourra pas vérifier le résultat mais la technologie pourra ouvrir de nouvelles pistes de recherche, inciter à réviser un jugement précédent, si elle propose un auteur avec une probabilité de plus 80 %* », indique Dominique Stutzmann.

Dans un registre plus contemporain et judiciaire, la méthode pourrait mener à l'identification d'auteurs de formats courts tels des e-mails, des messages sur un forum, ou d'un article de recherche privé de sa référence, etc. Voire nommer, si nécessaire, un internaute intervenant sous pseudonyme ou à partir d'un compte piraté. Plusieurs articles scientifiques issus des universités américaines de Stanford ou de Houston explorent ces possibilités. Sans compter la détection de plagiats, piste étudiée par un chercheur de l'université d'Agder en Norvège. En effet s'il est devenu simple et rapide de copier en raison de la masse des documents accessibles en ligne, il sera peut-être tout aussi aisé, demain, de repérer les faussaires. ■

Arnaud Devillard @A_Devila

POUR EN SAVOIR PLUS

- À propos des chansons Lennon-McCartney : **sciav.fr/876Lennon**
- À propos de la pièce *Henry VIII* : **sciav.fr/876Henry**



ALEET ALE

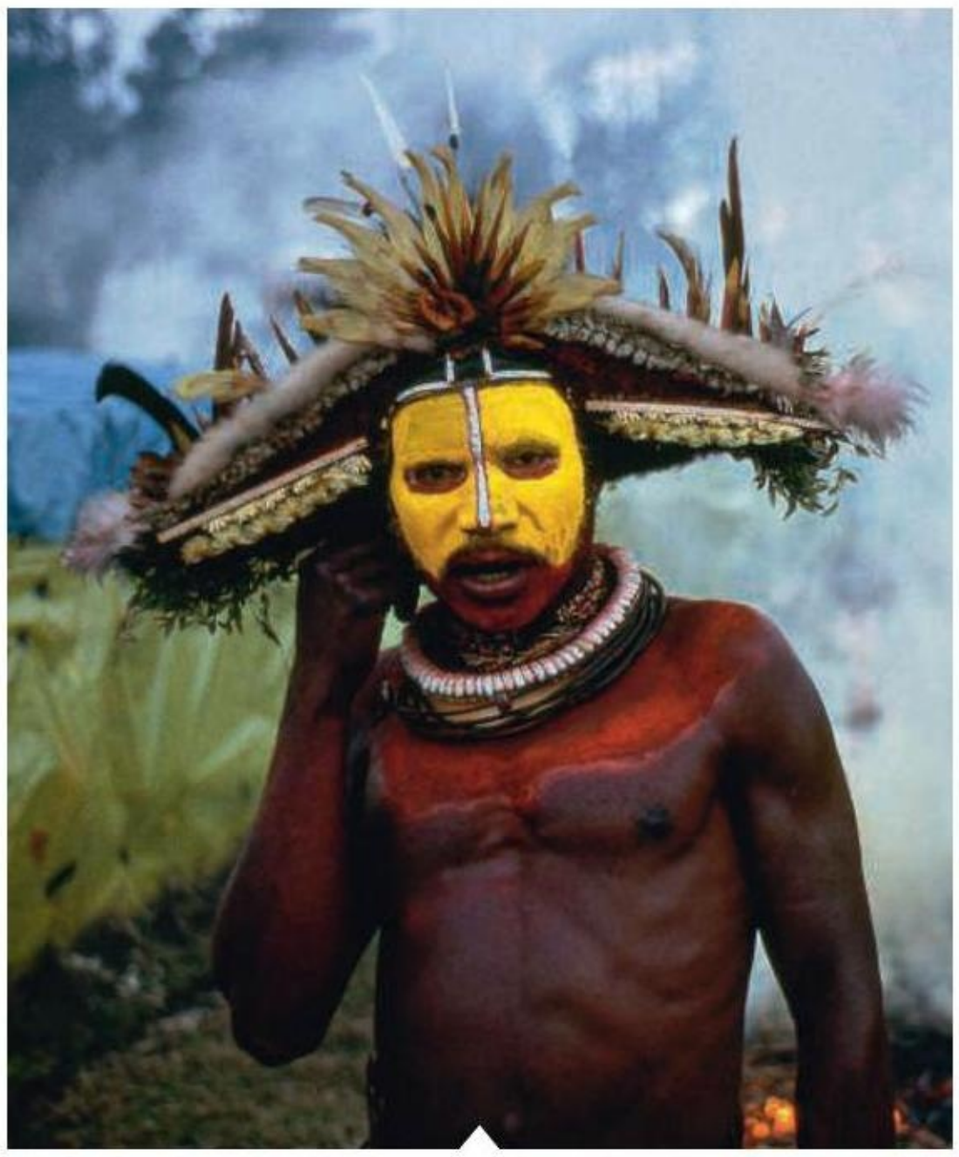
L'IA a contribué à confirmer que Corneille (à droite) n'est pas l'auteur des pièces de Molière (à gauche).

Les Papous, une mémoire de l'humanité

Les habitants de Papouasie-Nouvelle-Guinée posséderaient certaines des plus anciennes traces d'ADN moderne présentes à l'extérieur de l'Afrique il y a plus de 50 000 ans.

« IL FAUT CHERCHER PLUS À L'EST », s'est dit François-Xavier Ricaut, chercheur au laboratoire Évolution et diversité biologique de l'université Toulouse III-Paul-Sabatier, alors qu'il débutait en 2016 le Papuan Past Project (Projet passé papou, archéologie et génétique en Papouasie-Nouvelle-Guinée), un projet d'étude concernant les premiers peuplements humains de Mélanésie, l'un des grands groupes d'îles de l'Océanie. Après sept années passées à Bornéo, le jeune généticien est convaincu que c'est dans cette région du monde, en Papouasie-Nouvelle-Guinée, que l'on pourra comprendre comment se sont dispersés les premiers humains après leur sortie d'Afrique, il y a environ 60 000 ans.

À cette époque, la Nouvelle-Guinée, l'Australie et la Tasmanie ne formaient qu'un seul et unique mégacontinent, appelé Sahul. Isolées du reste du monde pendant des milliers d'années, ses populations possèdent un génome dont une partie provient de métissages avec d'autres espèces d'*Homo* croisées sur leur route de migration. *« Si les Papous conservent, comme les Européens, 2 à 3 % de génome de Neandertal, ils détiennent en plus 5 à 6 % de génome de Denisova, une espèce d'*Homo *éteinte, ainsi qu'un petit pourcentage d'un génome d'*Homo *archaïque non encore identifié »*, détaille François-Xavier Ricaut. L'isolement de ces populations les unes par rapport aux autres a favorisé la différenciation entre les groupes d'*Homo*, ce qui a conduit à une exceptionnelle diversité linguistique et culturelle, mais aussi génétique. *« La Papouasie-Nouvelle-Guinée compte 8 millions d'habitants, mais cette diversité est équivalente à celle rencontrée entre le sud de l'Inde et l'Irlande ! Nous pouvons imaginer que des Homo sapiens, arrivés sur place il y a 50 000 à 60 000 ans, sont allés d'île en île, rencontrant d'autres groupes d'*Homo *avec lesquels ils se sont métissés, accumulant ainsi de nouveaux gènes au cours de leur avancée. »*



FRANÇOIS GUÉNET/DIVERGENCE

Le patrimoine génétique des Papous, unique au monde, comprend entre 2 et 3 % d'ADN de Neandertal, entre 5 et 6 % de Denisova et un faible pourcentage d'une espèce humaine non identifiée.

Des fouilles archéologiques pour compléter les analyses

À ce jour, les prélèvements d'ADN effectués au sein de communautés des Hautes et Basses Terres ainsi que sur l'archipel de Bismarck en Papouasie-Nouvelle-Guinée ont permis d'analyser 80 génomes complets, 120 autres étant en cours de traitement à Paris et en Australie. Des analyses génétiques réalisées grâce à la forte participation des populations locales au Papuan Past Project. Au même titre que les scientifiques, ces habitants souhaitent savoir qui sont leurs ancêtres et s'ils sont arrivés par la route du nord, les Célèbes, ou encore celle du sud, Timor puis l'Australie.

Pour répondre à toutes ces questions, des fouilles archéologiques sont menées parallèlement aux analyses génétiques. Et les derniers résultats tendraient à démontrer qu'au moins deux groupes différents sont arrivés à Sahul il y a plus de 50 000 ans. Les deux routes auraient pu être utilisées. ■

Bernadette Arnaud
@NarudaaArnaud

Après l'Australie, des mégafeux menacent-ils la France ?

Des feux similaires à ceux qui ravagent l'Australie ont déjà tué en Grèce ou au Portugal. Pour la première fois, des experts donnent l'alerte : la France ne sera pas épargnée.

Par Rachel Mulot @RachelFleaux

Vus de nos écrans, ils semblent lointains ces meurtriers feux australiens, ces koalas au pelage fumant, ces huit millions d'hectares ravagés *(lire l'encadré page suivante)*. Tout comme les incendies qui ont dévoré l'Amazonie en 2019, la plus grande forêt tropicale au monde, et tué 85 personnes en 2018 dans l'État de Californie, le plus peuplé des États-Unis. Depuis une quinzaine d'années, les feux extrêmes, ou mégafeux, ne sont plus l'exception, et se répètent tragiquement sur la planète, au gré des saisons les plus sèches. On se souvient que les brasiers gigantesques de Grèce en 2018 et du Portugal en 2017 ont fait respectivement 94 et 105 morts, à nos portes, en Europe. Mais peu ont pris la mesure de l'incendie destructeur de Rognac (Bouches-du-Rhône) en août 2016. « *Ce fut une catastrophe humaine évitée de justesse* », selon le capitaine Patrick Tissot, du Service départemental d'incendie et de secours (SDIS) des Bouches-du-Rhône, car les flammes auraient pu embraser jusqu'aux quartiers nord de Marseille après avoir dévoré 2600 hectares de garrigue, fait plus de 30 blessés et 400 sinistrés. La France, troisième pays le plus boisé de l'Union européenne, serait-elle à son tour exposée à ces mégafeux, particulièrement

65 000 feux de broussailles ont été comptabilisés par la Nasa dans l'État de Nouvelle-Galles du Sud en 2019, contre 13 000 en moyenne lors des 18 années précédentes (ici près du lac Conjola le 31 décembre).

MATTHEW ABBOTT/THE NEW YORK TIMES - REDUX - REA

AUSTRALIE

Le scénario du pire

Une conjonction de facteurs (sécheresse, températures et vents sévères) a entraîné des incendies plus dévastateurs que jamais en Australie. En 2019, l'année la plus chaude et sèche jamais observée sur l'île, la saison des feux a démarré bien avant l'été austral, dès septembre, au lieu de décembre en général. Cette précocité était redoutée, après trois années consécutives de sécheresse, qui ont laissé une végétation particulièrement inflammable au sortir de l'hiver. En brousse, les départs de feu se sont vite comptés par centaines, attisés par des vents violents et des températures maximales records de 41,9 °C en moyenne en décembre. Les pompiers ont alors affronté le pire des scénarios : au nord de Sydney, huit incendies ont fusionné en un mégafeu. À la mi-janvier, 80 000 km² (l'équivalent de la région Nouvelle-Aquitaine) avaient été ravagés, une trentaine de personnes tuées, et des milliers de bâtiments détruits. Pis, une des zones qui avait fait l'objet en 2016 d'un débroussaillement par brûlage dirigé a de nouveau flambé cette année. Les autorités n'ont eu d'autre choix que d'évacuer plus d'une centaine de milliers de personnes. Des animaux n'ont pas pu fuir et près de 500 millions d'entre eux ont péri, dans le seul État de Nouvelle-Galles du Sud.

en Méditerranée ou dans la forêt landaise considérées comme les zones les plus à risque ?
C'est la conviction d'un petit groupe d'une vingtaine d'experts de l'ONF (Office national des forêts), de l'Inrae *(lire p. 105)* ou des services de secours, qui ont décidé de « lancer l'alerte » après avoir évalué la menace, au cours d'un colloque au printemps 2019 organisé par l'association Forêt méditerranéenne*. Dans une note de synthèse, adressée depuis au Parlement, aux administrations, aux collectivités et aux acteurs de la lutte contre les incendies, ils font part de leur « *effarement* » et de la nécessité d'« *agir sans délais* ». « *Le feu de Rognac sonne comme un avertissement sans frais*, assure l'ancien ingénieur général des ponts, des eaux et des forêts Charles Dereix, président de l'association. *C'est un miracle qu'il n'y ait pas eu plus de victimes face à une nouvelle forme d'incendie d'une puissance inédite, nourrie par un cocktail fait de changement climatique, d'augmentation de la biomasse combustible et de dissémination de l'urbanisation.* » Même état d'esprit chez Éric Rigolot, directeur de l'unité de recherche Écologie des forêts méditerranéennes à l'Inrae d'Avignon, qui travaille sur l'intérêt du débroussaillement pour la sécurité des constructions et des personnels de secours : « *N'attendons pas un drame pour réviser notre stratégie* ▶

ÉRIC RIGOLOT

« N'attendons pas un drame pour réviser notre stratégie de défense des forêts »

Éric Rigolot, directeur de l'unité de recherche Écologie des forêts méditerranéennes à l'Inrae d'Avignon

Le terme mégafeu, du mot anglais *megafire* créé aux États-Unis dans les années 2000, désigne un feu extrême, par son étendue, son intensité et sa gravité, mais ne fait pas l'objet d'un consensus scientifique. Les critères varient selon les pays, l'étendue, par exemple, doit être exceptionnelle pour la région concernée.

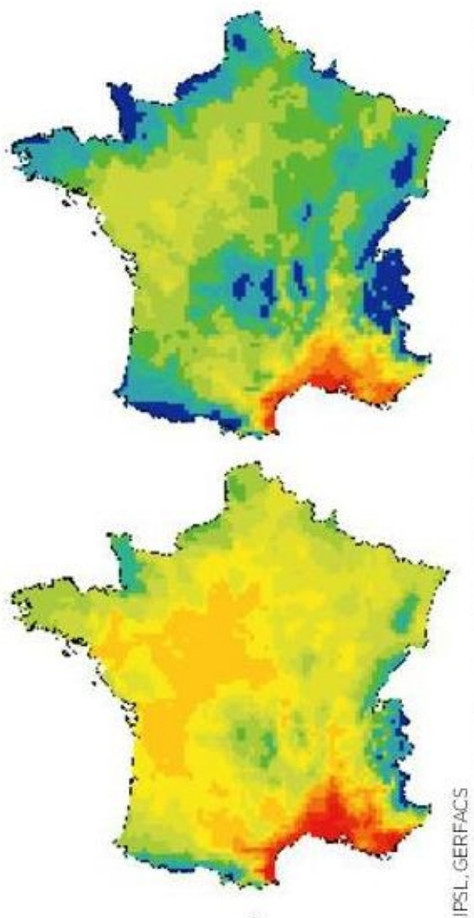
▶ Conditions
Le mégafeu se déclenche et prospère quand les températures sont élevées, l'hygrométrie faible, les végétaux très secs et le combustible dense (broussailles, bois mort, arbres).

▶ Comportements observés
Les feux dits convectifs extrêmes dégagent des panaches de gaz et de fumée brûlants s'étendant sur plusieurs kilomètres, susceptibles d'embraser d'autres zones. Ils modifient l'atmosphère jusqu'à 20 000 m d'altitude. Ils génèrent des sautes de feu, avec des pluies de brandons, supérieures à 1 km. Ils se caractérisent aussi par une très grande

▶ *de défense des forêts.* » En effet, contrairement aux feux classiques *« qui, bien anticipés et circonscrits, peuvent être bénéfiques pour la régénération de la végétation, ces phénomènes extrêmes affolent par leur caractère inextinguible et profondément, durablement ravageur »*, souligne la philosophe Joëlle Zask, de l'université d'Aix-Marseille, auteure de *Quand la forêt brûle* (Premier Parallèle, 2019).

Car le changement climatique, qui verra la température annuelle moyenne en France augmenter d'au moins 2 °C d'ici à 2050, favorisera les conditions d'éclosion et de propagation des incendies, en raison de sécheresses accrues sur des surfaces plus étendues. Aujourd'hui, plus des trois quarts des surfaces détruites par les feux de forêt sont localisées dans le Grand Sud, riche en broussailles ou en garrigues. Mais *« les scénarios d'évolution climatiques des experts internationaux du Giec* [Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat] *montrent une tendance à l'extension du risque : d'abord vers le Sud-Ouest, l'Ouest (Bretagne, Val de Loire, Île-de-France) et la haute vallée du Rhône avant de concerner quasi tout le territoire national, vers la fin du siècle »*, rapporte Yvon Duché, responsable national incendie à l'ONF.

Les pics de sécheresse et de chaleur affaibliront les peuplements forestiers, dont la « biomasse combustible » ne cesse par ailleurs de croître, la forêt s'étendant de 1 à 2 % par an depuis trois décennies. Fait inquiétant : le bois mort s'accumule dès à présent car le réchauffement profite déjà aux ravageurs tel le scolyte, un coléoptère qui fait crever sur pied des massifs entiers d'épicéas dans l'est de la France. Nettoyer les forêts, en proie à une grave crise sanitaire, est devenu une urgence aussi coûteuse que dangereuse (en raison des chutes de branche), dans les forêts privées comme publiques. *« Les départs de feux pourraient se multiplier à des latitudes où les populations et les services de secours ne sont pas préparés à ces phénomènes »*, estime Hervé Le Bouler, ancien de l'ONF, aujourd'hui administrateur à France nature environnement (FNE), fédération nationale d'associations de protection de la nature. Ainsi, le plus grand incendie de l'année 2018 a eu lieu... dans le Jura. Et en 2015, les habitants de la banlieue sud du Mans (Sarthe) ont vu leur premier Canadair lors d'un feu de pins maritimes. *« Ces incendies seront sans doute la norme dans les années à venir et la stratégie nationale d'attaque massive des feux naissants ne sera pas suffisante*, redoute Patrice Tissot. *Il faut changer d'échelle dans notre réflexion sur la prévention. »*



Évolution du risque d'incendies en France entre 2008 et 2050 selon un scénario intermédiaire établi à partir des données du Giec (en rouge, risque maximal).

DRIAS, MÉTÉOFRANCE, CNRM-GAME, IPSL, GERFACS

Une virulence qui dépasse le seuil de « défendabilité »

Florence Vaysse, responsable de la cellule Feux de forêts de la zone Sud à Météo France, est plus nuancée. Dans l'Hexagone, un seul incendie de végétation a dépassé le seuil des 10 000 hectares ravagés, celui de Vidauban (Var), en 1990. *« Certes, les feux très rapides, virulents, et donc très dangereux, déjà connus dans le Sud, vont se multiplier, mais la survenue de méga-incendies est peu probable en France,*

vitesse : les flammes atteignent au moins 10 km/h et jusqu'à 60 km/h, elles peuvent dévorer jusqu'à 50 km² en 60 min. Le pire survient lorsque plusieurs foyers se rejoignent. La puissance de l'incendie est supérieure à plusieurs milliers de kilowatts par mètre. Ces feux extrêmes produisent enfin leurs propres vents et peuvent parfois déclencher des orages.

▶ Conséquences
Les pompiers sont dépassés par ces incendies hors normes, qui ne s'éteignent souvent qu'après un changement météo. On déplore des atteintes massives aux personnes, aux biens et à la faune.

BRUNO BOURGEOIS

explique-t-elle, cartes à l'appui. *La végétation combustible n'est pas aussi étendue et continue qu'en Australie, au Canada, en Californie, en Russie ou dans le nord du Portugal. Elle est généralement fragmentée par la forte densité de routes, de zones cultivées ou habitées et de cours d'eau qui sillonnent la France.* »

Le même argumentaire est développé par Thomas Curt, spécialiste du risque incendie à l'Inrae, dans un article de *The Conversation*. Pas de quoi apaiser Éric Rigolot et Charles Dereix : « *Même si les forêts provençales de chênes verts et de pins d'Alep sont moins hautes que les forêts portugaises d'eucalyptus ou de pins maritimes, elles dégagent en brûlant dans des conditions météorologiques extrêmes, des puissances de feu de plusieurs milliers de kilowatts par mètre, bien au-delà du seuil dit de défendabilité par les forces de lutte !* », rétorquent-ils. Un sapeur-pompier est équipé pour résister à une puissance de 20 kilowatts par mètre et un camion-citerne se déplace de quelques centaines de mètre par heure. Or, l'incendie de Rognac, « *survenu dans un département parmi les mieux dotés au monde en moyens matériels et humains* », était hors normes, non par sa taille (14,9 km sur moins de 2 km, mais par sa vitesse de propagation — de 3200 à 5200 m/h, avec des sautes de feu allant jusqu'à 1 km — et sa puissance « *équivalente à une tranche de centrale nucléaire* », selon Patrick Tissot. « *Les attaques directes étaient inefficaces voire dangereuses pour nos personnels et les techniques de lutte aérienne peu performantes* », souligne-t-il.

YANN AVRIL/BIOSPHOTO

Attaqués par des coléoptères, les épicéas des Vosges accumulent du bois mort, combustible de choix pour les feux de forêt.

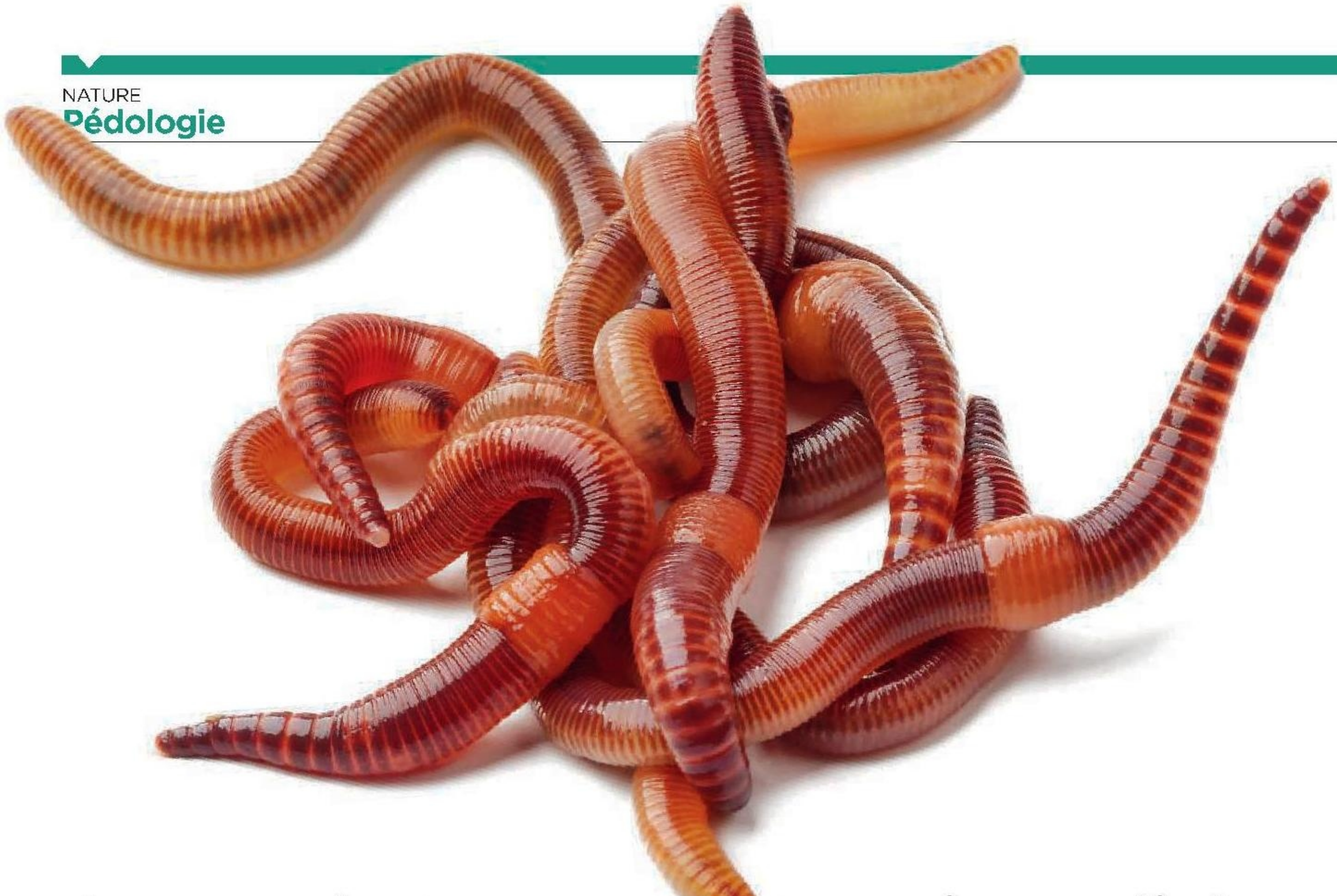
De surcroît, les secours ont dû, comme souvent, concentrer la lutte sur les biens et les personnes, quitte à laisser le reste de la forêt brûler.

Pour les spécialistes, des solutions existent : mieux exploiter la forêt, dessiner des « pyropaysages » destinés à couper les feux, rétablir des « zones tampons » agricoles, faire appliquer les obligations légales de débroussaillage, inciter les propriétaires à l'autoprotection de leur maison grâce à des matériaux peu combustibles et à un système d'arrosage et limiter — voire abandonner — les habitations sises à l'interface de la forêt. Selon un recensement de l'ONF en 2008 dans le seul midi de la France, 500 000 constructions et 1,5 million de résidents étaient situés dans une zone de forêt à fort risque. « *Les nouveaux habitants de ces interfaces n'ont pas la culture du feu, ni celle de l'entretien de leur domaine. C'est là que réside le danger* », estime Christophe Bouillon, de l'Inrae d'Aix-en-Provence.

L'Europe a lancé un appel à projets de recherche

La lecture de la base Prométhée, qui recense les principaux incendies en France, et celle des bases étrangères, est sans appel : 85 à 98 % des sinistres sont provoqués par des êtres humains, volontairement, par accident ou négligence. Dont celui de Rognac, dû à un mégot de cigarette. Consciente des enjeux, l'Europe a lancé un appel à projets de recherche sur les mégafeux, dont les résultats devraient être publiés cette année. Les lanceurs d'alerte français en sont convaincus : « *Ces feux convectifs extrêmes [voir l'infographie] que l'avenir nous promet nécessitent des mesures de rupture qui n'ont pas encore été identifiées.* » ■

* « Changer notre regard sur les incendies de forêt », journée du 12 mars 2019, Carry-le-Rouet. *Forêt méditerranéenne*, Tome XL, n° 2, juin 2019.



PICTUREPARTNERS / ALAMY / PHTO12

Le ver de terre, acteur primordial de la fertilité des sols

Une étude d'ampleur inédite remet en lumière le rôle essentiel de cet « ingénieur des sols » et alerte sur le danger que fait peser le dérèglement climatique sur cet invertébré.

EN CREUSANT PLUS DE 7000 TROUS normalisés de 30 centimètres de côté et autant de profondeur dans 56 pays, des chercheurs ont fait avancer la science... à coups de bêches. Partis en quête de vers de terre, ils ont exhumé une belle surprise ! À l'inverse de la quasi-totalité du monde vivant, la biodiversité locale des annélides terrestres — terme qui regroupe l'ensemble des vers annelés — est plus importante dans les zones tempérées qu'aux tropiques comme en témoigne une vaste étude qui a fait la une de la revue *Science* *(voir carte p. 66)*. Ainsi, si le nombre d'espèces y est vraisemblablement moins important, leur variété y est plus forte à l'instar de la France où cohabitent trois familles qui occupent chacune des tranches de sol différentes *(voir schéma p. 65)*. Une présence qui s'explique par leur mode de vie. « *Les vers de terre se révèlent très sensibles aux conditions d'humidité des sols et de température car ils respirent par la peau et ont peu de moyens de limiter les pertes en eau* », explique Raphaël Marichal, chercheur au Cirad (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) et l'un des 140 participants à cete étude. Raison pour laquelle celle-ci met aussi en exergue une autre nouvelle, beaucoup moins réjouissante : à l'instar de nombreuses autres espèces, les vers de terre sont menacés par le réchauffement climatique, ce qui risque d'entraîner un bouleversement majeur des écosystèmes.

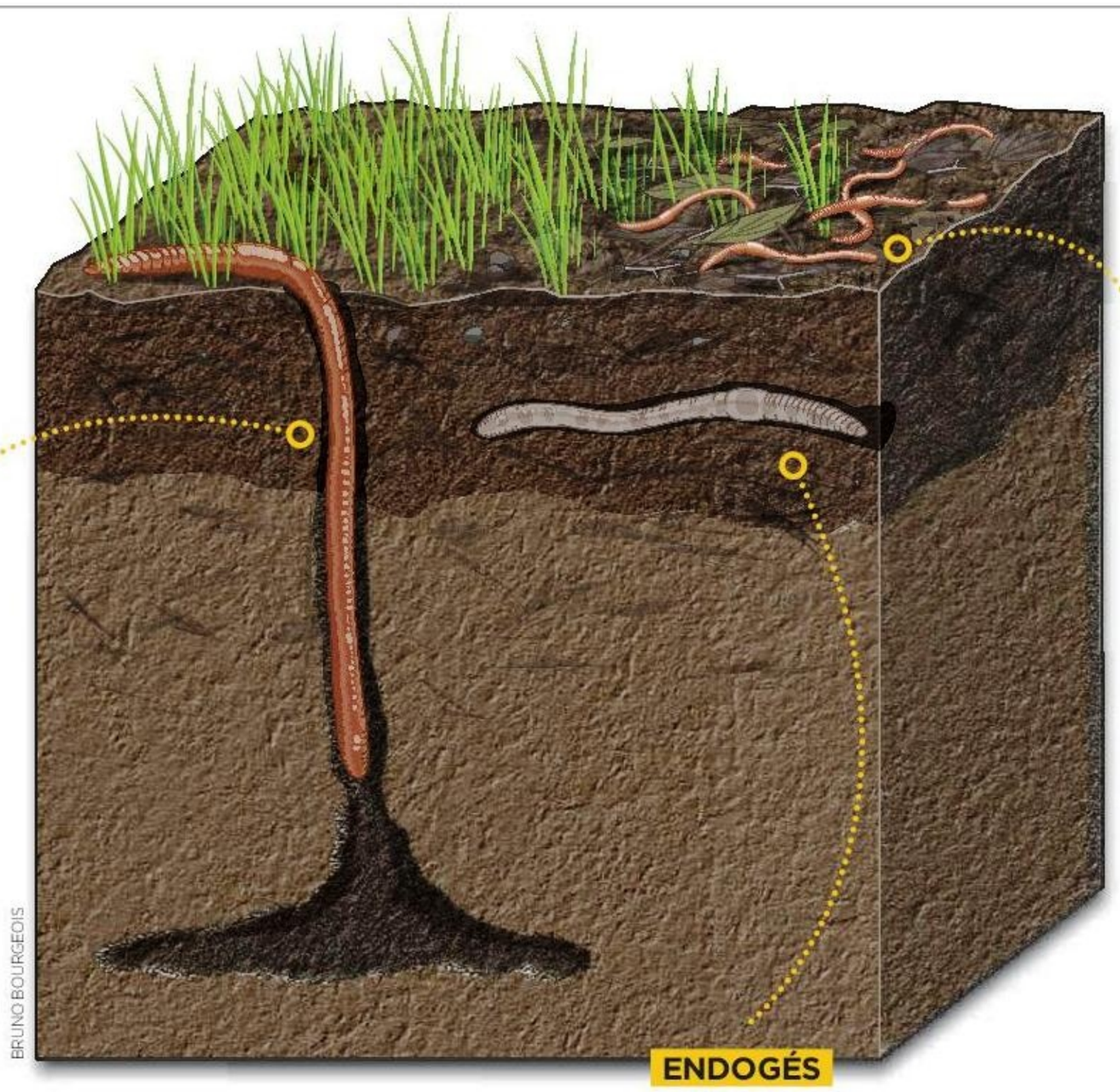
50 %
la proportion de la biomasse de tous les animaux terrestres représentée par les seuls vers de terre.

10 000
le nombre d'espèces estimé dans le monde, dont 6000 identifiées.

Charles Darwin ne s'était pas trompé en consacrant en 1881 son dernier ouvrage aux vers de terre. Cet animal modeste représente en effet 200 millions de tonnes de biomasse à l'échelle de la planète, soit la moitié du poids total des animaux terrestres ! Mais il

BIODIVERSITÉ

Les trois familles présentes en France



BRUNO BOURGEOIS

ANÉCIQUES

Taille : 10 à 110 cm.

Mode de vie : creusent des galeries verticales. Se nourrissent de matière organique qu'ils viennent chercher à la surface et enfouissent dans leur galerie. Rejettent des déjections à la surface du sol.

Rôle : brassent et mélangent la matière organique et minérale.

ÉPIGÉS

Taille : 1 à 5 cm.

Mode de vie : colonisent la surface et les amas organiques en se nourrissant de feuilles, de bouses et d'écorces.

Rôle : participent au fractionnement de la matière organique.

ENDOGÉS

Taille : 1 à 20 cm.

Mode de vie : creusent des galeries horizontales et ne remontent pas à la surface. Se nourrissent de matière organique plus ou moins dégradée (racines mortes, humus).

Rôle : créent une structure grumeleuse qui joue un rôle sur la rétention et l'infiltration de l'eau dans le sol.

aura donc fallu attendre 2019 pour qu'un patient travail de recherche tente d'en estimer la population globale. « *Ces animaux vivent dans le sol et se déplacent peu*, poursuit Raphaël Marichal. *Le taux d'endémisme* [espèces présentes uniquement dans une aire de répartition donnée] *est donc très important si bien qu'on estime que le nombre d'espèces, actuellement fixé à 6000, pourrait s'élever à 10 000 !* » Une certitude : ce n'est pas dans les régions polaires ni dans les zones désertiques qu'il faudra chercher ces espèces encore inconnues. Comme ils se déplacent peu, les vers ont en effet beaucoup de mal à recoloniser les terres conquises par les dernières glaciations. Aux États-Unis, leur éton-nante présence dans les États les plus septentrionaux s'est vraisemblablement opérée grâce aux humains qui ont favorisé leur réimplantation.

C'est donc aux tropiques, où les coups de pelles pour les dénicher ne sont pas encore assez nombreux, qu'il faudra creuser. Et vite… la dégradation des terres, la désertification et la montée du niveau des mers risquent en effet de leur être fatales tant ces animaux dépendent de l'humidité et de la qualité des sols. La France, qui compte quelque 130 espèces (50 sont présentes au nord de la Loire, 120 au sud dont 60 endémiques) n'est pas épargnée. « *Les sécheresses récurrentes constatées sur le pourtour méditerranéen vont certainement affecter des populations vivant dans les zones les plus chaudes, les espèces plus répandues prenant la place d'espèces endémiques moins adaptées aux pratiques agricoles* », craint Yvan Capowiez, chercheur à l'Inra Avignon (Institut national de la recherche agronomique).

Les pesticides de synthèse font des ravages

Cette menace s'ajoute à celle des modes de culture qui affecte déjà fortement leur densité. Une étude de 2003 a ainsi dénombré 103 kg de vers par hectare dans des champs de maïs pour 4 espèces présentes contre 371 kg et 6 espèces dans des prairies temporaires — sans cultures durant quelques années — et 1450 kilos et 11 espèces dans des prairies permanentes. Les pesticides de synthèse font des ravages. Ainsi, Céline Pelosi, de l'unité de physico-chimie et écotoxicologie des sols d'agrosystèmes contaminés à l'Inra, a comparé les compositions des populations de vers dans des sols sains et traités. ▸

SCIENCE PARTICIPATIVE

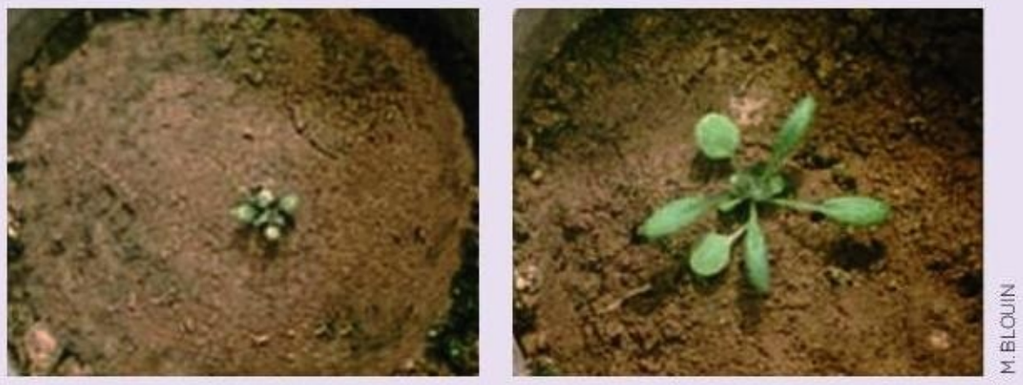
Un inventaire français

En 1972, le chercheur Marcel Bouché publiait l'inventaire des vers de terre de France à partir de 1400 sites répartis sur tout le territoire. 50 ans plus tard, cette répartition a-t-elle changé ? Pour répondre, l'UMR Éco & sols de Montpellier fait appel aux bonnes volontés, invitées à prélever des vers de terre près de chez elles selon un protocole normalisé et à les envoyer au laboratoire. Pour s'inscrire : sciav.fr/876Vers

BOTANIQUE

Un rôle de vaccin pour les plantes ?

Les vers de terre favorisent la pousse des plantes. C'est ce que les agriculteurs observent empiriquement et que Manuel Blouin, chercheur à AgroSup Dijon, a confirmé grâce à une revue de la littérature scientifique : la quantité de feuilles et de tiges augmentait en moyenne de 25 % ! « *Nous avons d'abord pensé que l'effet des vers était dû à leur travail du sol et au fait qu'ils pouvaient manger des nématodes pathogènes des plantes*, expose Manuel Blouin. *Mais les résultats nous ont conduits à rejeter ces hypothèses. Reste l'explication d'une communication chimique.* » Une possibilité qui commence à prendre corps. Les chercheurs ont ainsi mis des vers en présence d'une plante au génome connu (*Arabidopsis thaliana*). « *Nous avons constaté que les gènes responsables des mécanismes de défense s'exprimaient différemment en présence de vers*, poursuit Manuel Blouin. *Ce mécanisme peut préparer la plante à une attaque de pathogène comme le fait un vaccin chez les humains !* » Un effet encore inexpliqué. Il est possible qu'en ingérant les bactéries du sol, les vers excrètent des composés cellulaires bactériens (éliciteurs) à proximité des racines, provoquant un signal d'alerte. Même expérience fascinante avec des *Arabidopis* modifiées pour ne plus émettre d'auxine, une phytohormone gérant la croissance. Mises en présence de vers… elles parviennent à pousser ! Ruben Puga Freitas, du laboratoire de Manuel Blouin, a montré que les gènes responsables de la réponse aux stress biologiques ou abiotiques (sécheresse) sont modifiés. Prochaine étape : identifier l'agent de liaison entre l'animal, les bactéries et la plante.

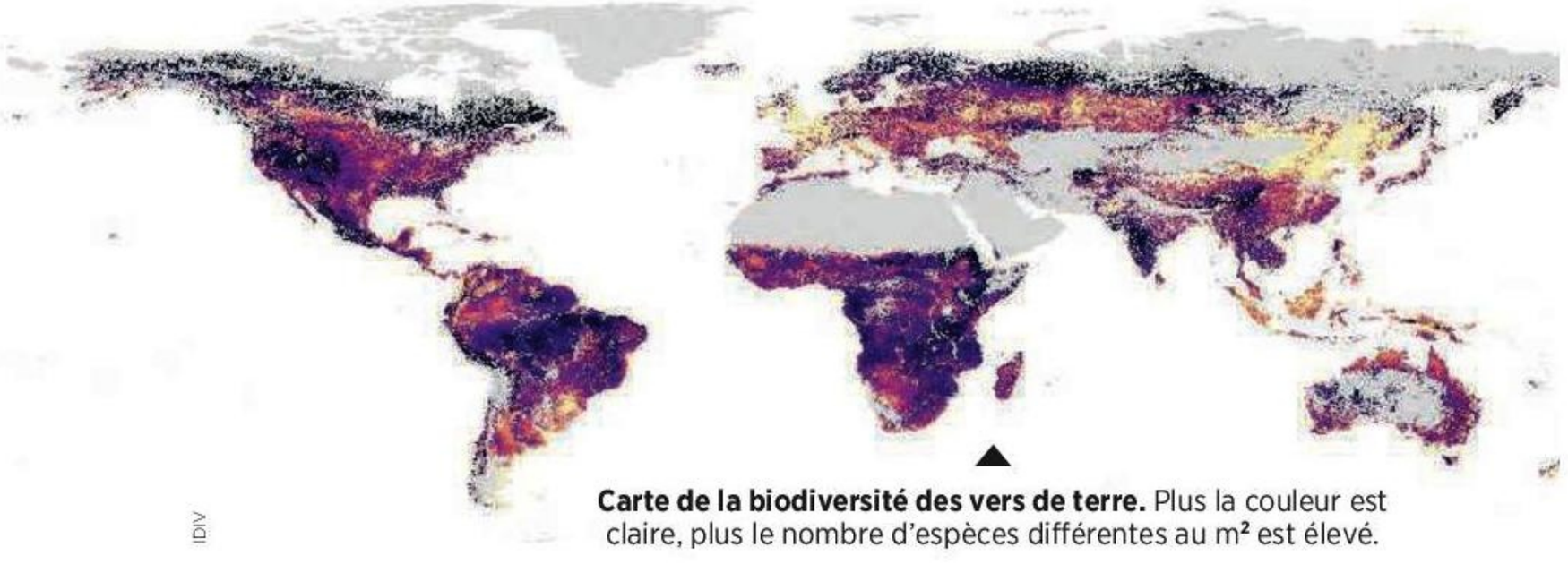


M. BLOUIN

Privée du gène de l'auxine, hormone de la croissance, « Arabidopsis » pousse mal *(à gauche)*. En présence de vers, elle y parvient *(à droite)*.

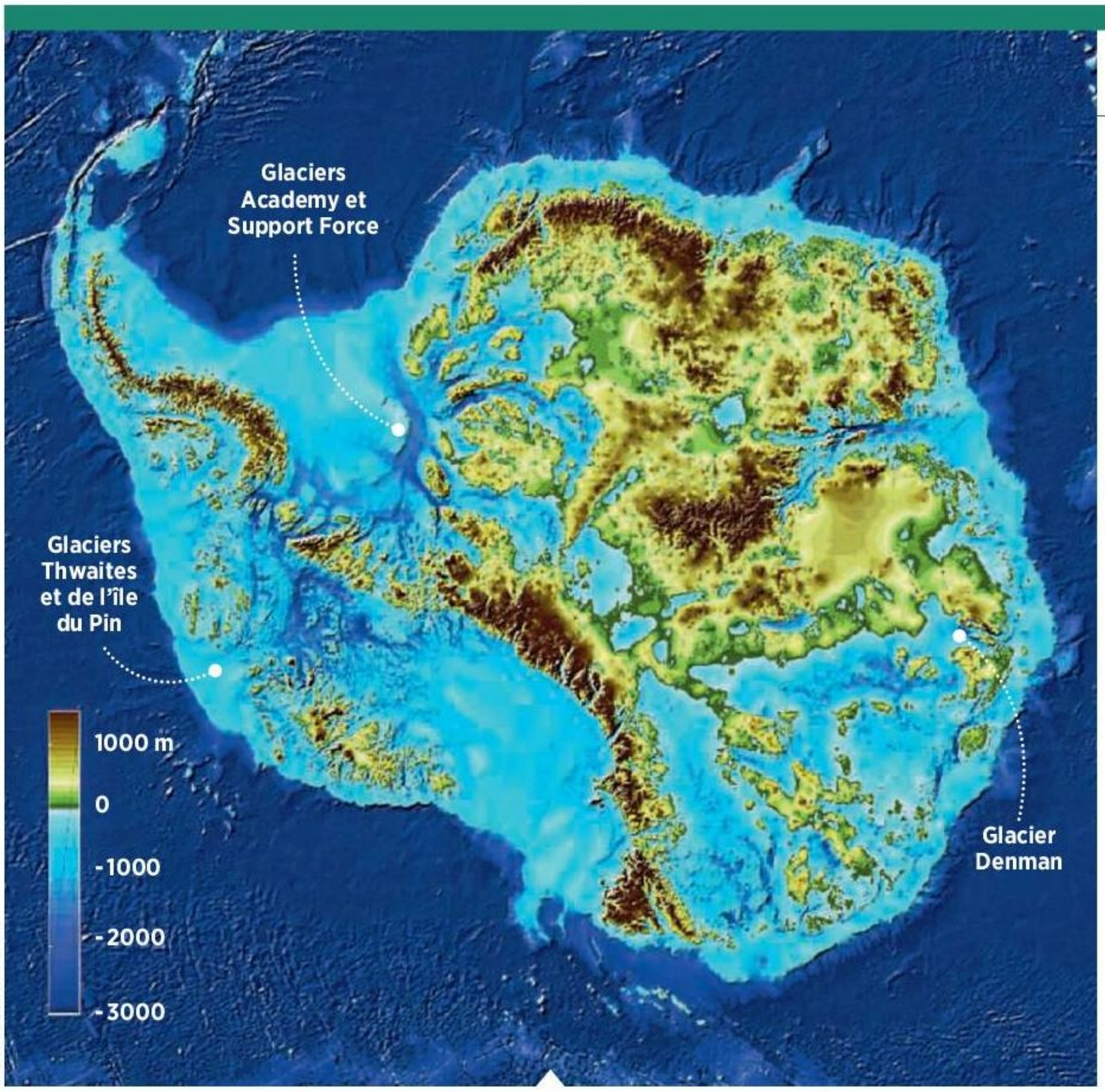
▸ Passer d'un IFT (indicateur de fréquence de traitement) 0 (agriculture biologique) à un IFT 4,5 ferait perdre 30 % des endogés et anéciques et décimerait les épigés. « *En France, une réduction de 50 % des pesticides comme le prévoit le plan Ecophyto 2018 entraînerait la multiplication par 4,8 des densités de* Lumbricus castaneus *(épigé) et par 1,5 celles de* Lumbricus terrestris *(anécique) et* Allolobophora chlorotica *(endogé)* », souligne la chercheuse. Autre résultat : il y a 2 à 4 fois moins de vers de terre dans les terres labourées que dans celles exploitées sans labours.
Si la préservation des espèces apparaît si importante, c'est que leur rôle est majeur. « *Notre étude établit que les menaces qui pèsent sur les vers de terre vont entraîner des bouleversements dans les fonctions et les services que fournissent ces ingénieurs souterrains des écosystèmes*, affirme Nico Eisenhauer, chercheur à l'université de Leipzig (Allemagne) et coordinateur de l'étude. *Nous sommes préoccupés par les éventuels effets en cascade sur d'autres organismes tels que les microbes, les insectes du sol et les plantes.* » « *Ingénieur des écosystèmes* » est en effet l'expression favorite des chercheurs et des agronomes, le ver de terre étant la clé de voûte de la fertilité des sols. « *Il crée des galeries qui aèrent les sols et facilitent la circulation de l'eau*, énumère Yvan Capowiez. *Il transforme la matière organique en minéraux assimilables par les plantes. Il l'enfouit et la rejette à la surface sous forme de déjections caractéristiques appelées turricules.* » Un ver ingère ainsi 30 fois son poids en sol chaque jour pour se repaître de matière organique ! Résultat : jusqu'à 30 tonnes par hectare sont ainsi « brassées » dans les prairies permanentes. D'autres relations chimiques étonnantes, qui restent à caractériser, se nouent également entre les vers de terre et les plantes *(lire ci-dessus)*. C'est un vrai trésor qu'exhument les bêches des scientifiques ! ■

Loïc Chauveau @Loic_Chauveau



IDIV

Carte de la biodiversité des vers de terre. Plus la couleur est claire, plus le nombre d'espèces différentes au m² est élevé.



Sous la calotte glaciaire, apparaissent les contours des reliefs terrestres, mettant en évidence ceux qui émergeraient si la glace fondait à la suite de l'élévation de 2 à 3 °C des températures.

Sous les glaces de l'Antarctique

Des chercheurs américains ont réalisé la carte topographique la plus précise jamais produite des reliefs rocheux invisibles du « continent blanc ».

IL Y A 3 MILLIONS D'ANNÉES AU PLÉISTOCÈNE, une augmentation de 2 à 3 °C de la température, par rapport aux normales actuelles, a entraîné une montée des eaux de 25 mètres, largement due à la fonte de l'Antarctique... Si un tel réchauffement — plausible — devait se reproduire dans la prochaine décennie, comment la calotte du continent blanc se comporterait-elle ? Pour répondre à cette question, il est essentiel de connaître la topographie du socle rocheux sur lequel repose la masse de glace. Jusqu'à présent, les cartographies étaient fondées sur des sondages de radars aéroportés, qui imposaient nombre d'interpolations — des traitements mathématiques. Une équipe de l'université de Californie à Irvine (États-Unis), menée par le Français Mathieu Morlighem, a quant à elle choisi de s'intéresser à l'épaisseur de la glace.

Pour ce projet, nommé BedMachine, les chercheurs ont utilisé les données enregistrées par 19 instituts de recherche depuis 1967, soit près d'un million de sondages radar. Ces données ont ensuite été corrélées avec les mesures bathymétriques de la calotte glaciaire, enregistrées de 2009 à 2018 lors des campagnes IceBridge de la Nasa, ainsi qu'avec celles de vitesse d'écoulement de la glace et d'activités sismiques. A ainsi été obtenue la carte topographique la plus précise jamais produite des reliefs rocheux invisibles de l'Antarctique. À cette occasion, les chercheurs ont pu mesurer la profondeur d'un gouffre étroit situé sous le glacier Denman, dans l'est du continent : plus de 3500 mètres sous le niveau de la mer. Ce qui en fait le canyon continental le plus profond du monde, dépassant de 100 mètres celui de Colca au Pérou, précédent détenteur du record !

Des crêtes faisant office de digues

L'autre résultat marquant est l'existence de crêtes faisant office de digues qui freinent les fleuves de glace s'écoulant entre les chaînes de montagnes transantarctiques. Inversement, du côté des glaciers Thwaites et de l'île du Pin, en Antarctique occidentale, la configuration des lieux risque d'accroître la rapidité de la fonte des glaces. De même, le lit rocheux qui s'étend sous les glaciers Academy et Support Force se trouve à des centaines de mètres plus profond que prévu, ce qui fragilise les glaces à l'aplomb, susceptibles de reculer plus rapidement. Cette nouvelle méthode de cartographie devrait permettre de produire des projections plus précises de l'élévation du niveau de la mer depuis l'Antarctique pour les décennies à venir : une étude australienne parue dans la revue *Nature* cet automne prévoyait en effet une élévation semblable à celle du pléistocène à partir de 2030... ■

Sylvie Rouat
@srouat1

Jérôme Chappellaz, glaciologue

Dans le chaudron de la glaciologie

Le nouveau directeur de l'Institut polaire français Paul-Émile-Victor est aussi à l'aise dans l'organisation d'une expédition scientifique que dans l'analyse des carottes de glace. Un de ses objectifs : créer une « glaciothèque » en Antarctique.

ENTHOUSIASTE ET PROLIXE, l'homme a le verbe direct, l'humour amical. Depuis quelques mois, Jérôme Chappellaz est à la tête de l'Institut polaire français Paul-Émile-Victor (Ipev), l'organisme chargé de mettre sur pied les missions scientifiques françaises en terres boréales et australes. C'est « *l'homme de la situation* », comme le résume le glaciologue grenoblois Jean-Robert Petit, sachant gérer aussi bien le travail sur la paillasse que l'organisation délicate d'une expédition ou les longs pourparlers avec les fonctionnaires. « *Il est d'une efficacité redoutable pour prendre des décisions rapides* », poursuit le scientifique. De fait, le directeur de l'Ipev a toujours aimé la vitesse.

À Grenoble, dans les années 1990, l'ingénieux chercheur du Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (LGGE, aujourd'hui IGE, Institut des géosciences de l'environnement) se déplace à moto de grosse cylindrée, qu'il démonte, remonte et améliore avec des pièces glanées au fil de lointains colloques. « *Il s'est ensuite bricolé l'un des premiers vélos électriques de la région grâce à un moteur importé de Californie monté sur un ancêtre du VTC* [vélo tout chemin] », poursuit son ancien collègue. Dans les années 2000, c'est à vélo couché qu'il avale les 13 kilomètres qui séparent son domicile du laboratoire. Novateur et visionnaire, Jérôme Chappellaz est surtout l'instigateur d'Ice Memory, un programme ambitieux de la Fondation université Grenoble-Alpes pour créer, en Antarctique, un sanctuaire de carottes de glace extraites des plus hauts glaciers du monde. L'objectif étant d'utiliser le cœur du continent blanc comme un congélateur naturel pour préserver la mémoire des climats passés à destination des générations futures. Une urgence à l'heure où le réchauffement climatique menace toute la cryosphère (ensemble des terres ou des mers couvertes de glace).

Bio express

1964 Naissance à Lyon.

1990 Entre au Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement, à Grenoble (LGGE).

2003 Directeur adjoint du LGGE.

2013 Mise au point de Subglacior, un spectromètre laser qui permet de réaliser des mesures directes dans les glaciers.

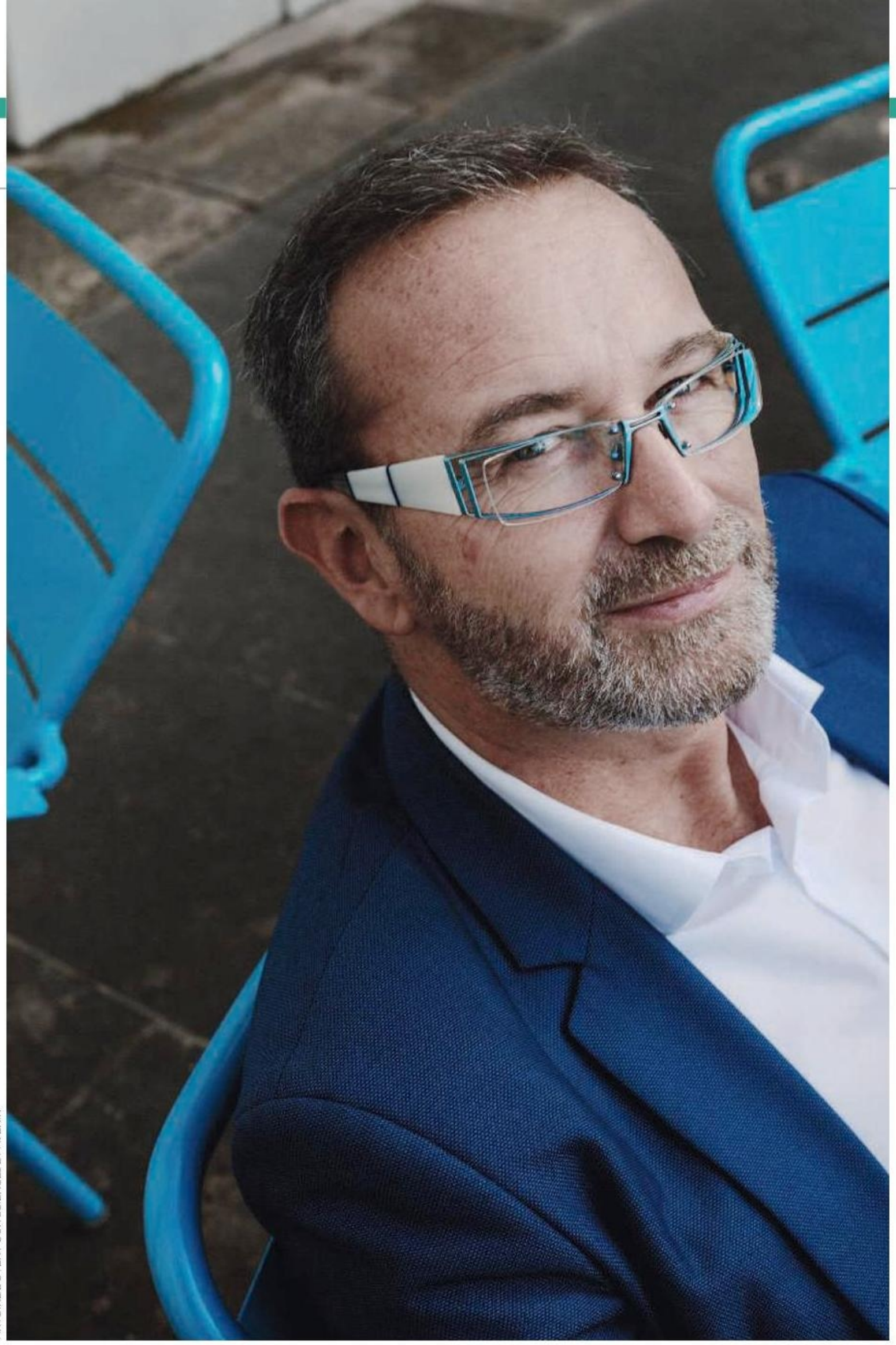
2015 Sortie de *La Glace et le Ciel*, un film de Luc Jaquet, dont il est le conseiller scientifique.

2018 Nommé directeur de l'Institut polaire français Paul-Émile-Victor (Ipev).

Des galaxies aux volcans puis aux gaz à effet de serre

Né à Lyon dans une famille savoyarde, Jérôme Chappellaz passe son enfance dans les senteurs de bois de la scierie familiale. Sa première « étoile », comme il se plaît à l'évoquer, s'allume le 21 juillet 1969 : il a 4 ans et assiste, devant le poste de télé, aux premiers pas de Neil Armstrong sur la Lune. Son imaginaire s'envole alors vers les galaxies... avant de dévier vers les volcans lorsque sa mère le conduit à une conférence d'Haroun Tazieff à l'âge de 9 ans. Au moment de faire dédicacer le livre du vulcanologue, celui-ci lui adresse un clin d'œil. « *Cela a été ma deuxième étoile* », se remémore Jérôme Chappellaz, qui rêve désormais de marcher sur les pas du célèbre scientifique. Un conseiller d'orientation le pousse alors vers des études de géologie mais il bifurque rapidement vers la géochimie, nouvelle discipline mise en place à Grenoble par Guy Perrier, un disciple de Claude Allègre, grande figure française de la discipline. Un soir, Claude Boutre, l'un des enseignants, projette le diaporama d'une expédition d'étude des polluants en Antarctique. Troisième étoile ! Jérôme Chappellaz fond cette fois pour la glaciologie et choisit de s'intéresser, pour sa thèse, aux gaz à effet de serre emprisonnés dans les carottes de glace. Choix judicieux ! Trois ans plus tard, en 1988, le climatologue américain James Hansen est auditionné devant le Congrès des États-Unis au sujet du changement climatique.

« *Le sujet a explosé pendant ma thèse,* raconte Jérôme Chappellaz. *J'ai eu la chance d'être plongé dans le chaudron de la glaciologie, où officiait Claude Lorius.* » Celui-ci est



ANTOINE DOYEN POUR SCIENCES ET AVENIR

le premier, avec le Français Jean Jouzel, à avoir corrélé la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre dus aux activités humaines avec les variations climatiques. Pour leurs études, les chercheurs grenoblois disposent de carottes de glace forées à Vostok — la station antarctique soviétique — dans lesquelles des bulles d'atmosphère ont été emprisonnées au fil des millénaires. « *Nous savions que nos résultats allaient avoir un impact majeur, c'était fantastique !* » s'enthousiasme le scientifique.

S'il y a une quatrième étoile, elle pourrait donc bien s'appeler Claude Lorius. Pour le glaciologue grenoblois Gaël Durand, ce dernier aura été pour le moins un inspirateur : « *Il est aujourd'hui à la tête de la logistique polaire française, comme l'a été Claude Lorius dans les années 1990.* »

Aujourd'hui comme hier, « *l'Ipev est une petite structure tournée vers l'opérationnel et l'aide aux autres, dans un environnement où le collectif et la solidarité sont indispensables,* souligne Jérôme Chappellaz. *Nous faisons des miracles à longueur de temps. Et au contact des chercheurs, je découvre la richesse du vivant, sa complexité.* » Lors de la dernière rotation du navire océanographique *Marion-Dufresne*, le glaciologue s'est ainsi émerveillé de la vie luxuriante adaptée aux îles australes, pourtant hostiles : éléphants de mer, albatros, pétrels géants... « *Un vrai choc intellectuel* », précise-t-il.

Relancer les actions en milieux polaires

Depuis un an, Jérôme Chappellaz est aussi chargé de rédiger une feuille de route scientifique en milieux polaire et subpolaire, aux côtés d'Antoine Petit, le président du CNRS. « *Nous voulons réunir des spécialistes de ces milieux et des chercheurs en ingénierie pour mettre au point des capteurs innovants, une robotique adaptée afin de faire émerger des idées et imaginer la science de demain* », poursuit-il. Le chercheur partage son temps entre Brest — siège de l'Ipev —, Paris, Grenoble — où vit son épouse — et les institutions internationales en lien avec les régions polaires. En décembre, il revenait d'un voyage en Antarctique avec la ministre de la Recherche Frédérique Vidal, organisé pour relancer les actions françaises en milieux polaires. « *C'est un vrai moteur, avec une forte capacité de travail qui remet l'institut en première ligne* », admire Christine David-Beausire, directrice adjointe de l'Ipev. La science polaire française a trouvé son chef de traîneau. ■

Sylvie Rouat

@srouat1

« C'est un vrai moteur, avec une forte capacité de travail qui remet l'institut en première ligne »

Christine David-Beausire, directrice adjointe de l'Ipev

CELLULE TUMORALE CIRCULANTE (CTC) Cellules cancéreuses relâchées par une tumeur dans la circulation sanguine. Elles sont susceptibles de migrer vers des tissus sains à distance pour y former des métastases.

CAPILLAIRES Les plus fins des vaisseaux sanguins de l'organisme. Ils sont structurés en petits réseaux intégrés aux tissus pour faire la jonction entre les circuits artériel et veineux.

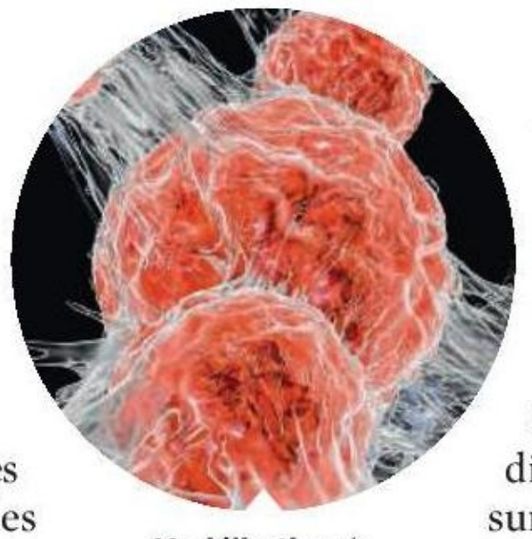
ORGANOTROPISME C'est la préférence qu'ont les tumeurs primaires envers certains organes plutôt que d'autres pour y disséminer les métastases. En particulier les os, les poumons, le foie et le cerveau.

Traquer les métastases à la cellule près

90 % des décès par cancer en France sont dus à la présence de tumeurs secondaires. Plusieurs programmes de recherche tentent de mieux comprendre les processus de cette dissémination dans l'organisme.

Par Hugo Jalinière @HugoJaliniere

REPÉRER DÈS LEUR APPARITION les cellules cancéreuses circulant dans l'organisme grâce à l'intelligence artificielle et empêcher qu'elles ne s'infiltrent dans de nouveaux organes. Telles sont les pistes novatrices pour tenter de lutter contre les redoutables métastases, ces « tumeurs secondaires » formées à distance à partir de cellules envoyées par la « tumeur primaire ». Car aujourd'hui, elles constituent toujours un angle mort pour la clinique : impossibles à prévenir, difficiles à détecter et plus encore à cibler avec les traitements disponibles. De sorte que si la survie à cinq ans est estimée à 98 % avec un cancer du sein ou un mélanome au stade localisé, ce chiffre chute respectivement à 25 et 10 % lorsque le cancer atteint un stade métastatique. Ainsi, 90 % des 150 000 décès par cancer en France chaque année sont dus à la présence de métastases.



SPL

Modélisation de cellules cancéreuses entourées de leur cytoplasme (en gris).

L'influence des vaisseaux et du flux sanguins

Pour tenter d'améliorer ces sombres pronostics, il faut mieux comprendre les processus de cette dissémination. Autrement dit, traquer une à une les nombreuses cellules qui se détachent de la tumeur primaire et parcourent la circulation sanguine pour se fixer finalement dans le site secondaire ciblé. C'est sur ce suivi des cellules tumorales circulantes (CTC) à l'échelle individuelle que se concentre l'équipe Biomécanique des tumeurs dirigée par le Dr Jacky Goetz (Inserm-

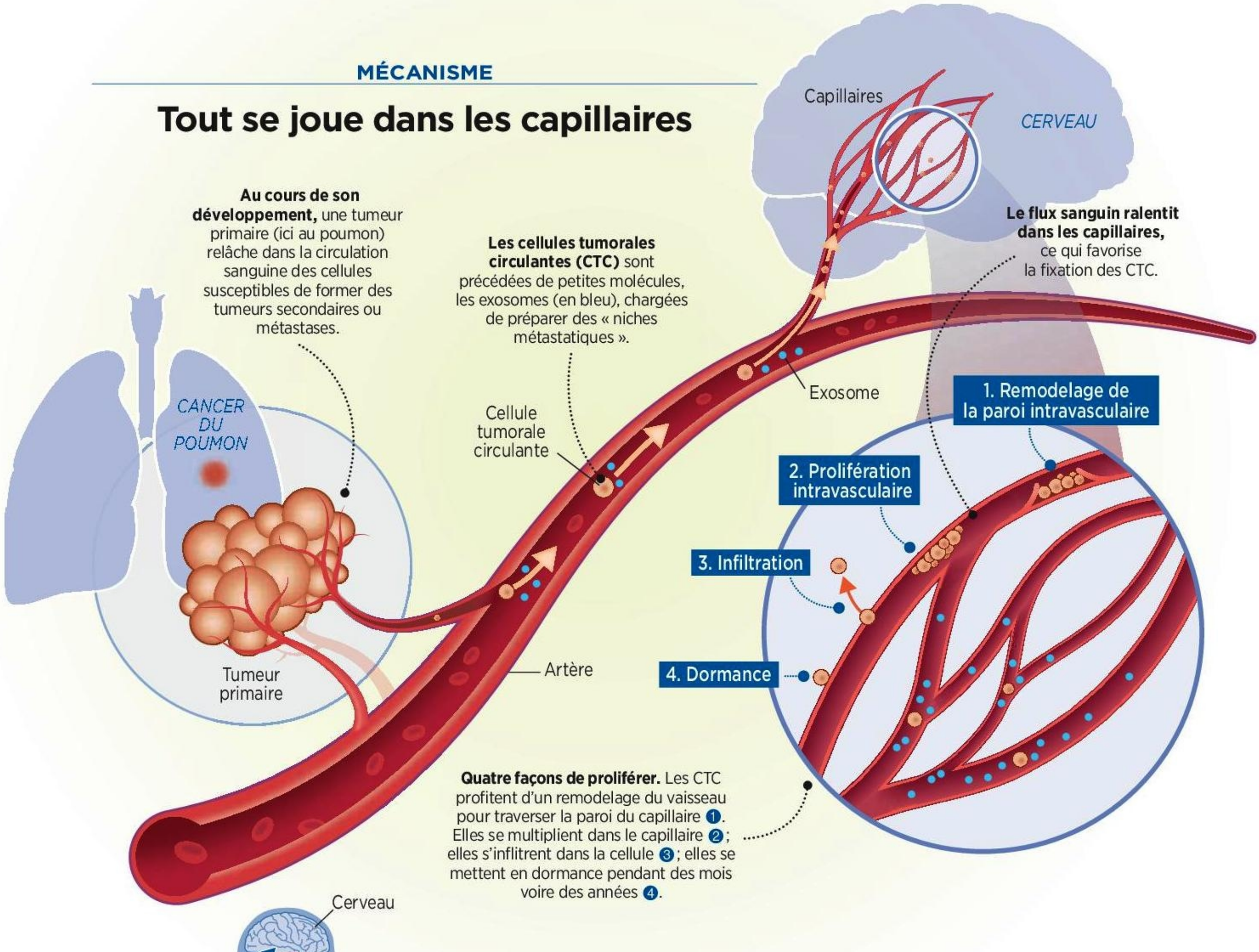
IMPESANTEUR

Des cellules cancéreuses envoyées dans l'espace

Des cellules cancéreuses seront envoyées d'ici au mois de mars par une navette SpaceX à bord de la Station spatiale internationale afin d'étudier leur comportement dans un environnement sans gravité. En effet, Joshua Chou, chercheur en ingénierie biomédicale à l'université de Sydney (Australie), a montré dans des expériences en microgravité réalisées sur Terre que l'impesanteur tendait à désactiver jusqu'à 90 % des cellules de quatre types de cancer testés (ovaire, sein, poumon, nez). La cohésion entre les cellules cancéreuses serait empêchée par l'absence de gravité conduisant en moins de 24 heures à leur autodestruction. Une idée qui est venue au jeune chercheur après une discussion avec l'astrophysicien britannique Stephen Hawking qui lui avait lancé que *« rien ne peut défier la gravité »*. Pas même le cancer ?

MÉCANISME

Tout se joue dans les capillaires



BRUNO BOURGEOIS

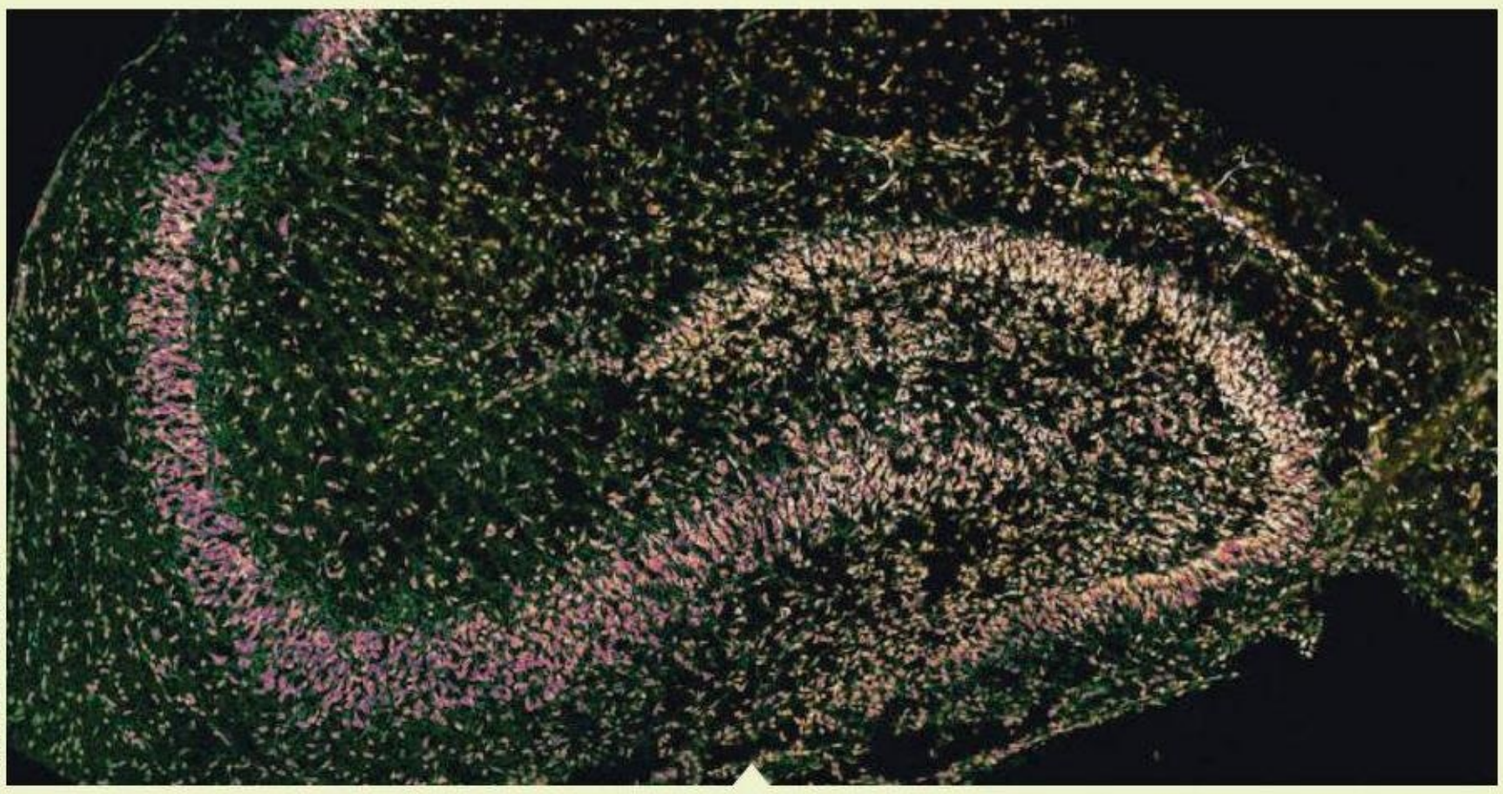
université de Strasbourg). Les chercheurs viennent de montrer que la capacité de ces cellules à coloniser de nouveaux tissus est fortement influencée par les propriétés des vaisseaux et du flux sanguins par lesquels elles transitent. Cette étude, publiée dans *Nature Reviews Cancer*, fait notamment suite à la mise au point, en 2016, d'une visualisation en 3D combinant trois techniques de microscopie. « *Nos travaux montrent que pour prévenir l'apparition des méta-stases, il faut tenir compte du rôle des fluides biologiques et non se focaliser uniquement sur les propriétés intrinsèques — génétiques et biochimiques — de la tumeur, de son microenvironnement ou de celui des métastases* », explique Jacky Goetz.

Concrètement, l'équipe a mené ses observations sur un modèle animal bien connu dans les laboratoires : le poisson-zèbre. Petit et transparent, il permet de suivre grâce à la microscopie 3D, *in vivo* et au nanomètre près, le parcours de cellules tumorales marquées par fluorescence. Les chercheurs ont ainsi pu les traquer et mesurer la façon dont le ralentissement du flux sanguin et la « topographie » des vaisseaux influencent la fixation

STRATÉGIE

Les tumeurs recrutent des neurones dans le cerveau

C'est l'une des stratégies les plus déroutantes des tumeurs cancéreuses : recruter directement dans des zones précises du cerveau des cellules capables de former de nouveaux neurones et les utiliser pour déployer un système nerveux propre à la tumeur. Un phénomène qui consolide le cancer et favorise sa progression. Cette découverte stupéfiante a été faite en 2019 par l'équipe de Claire Magnon, de l'Institut de radiobiologie cellulaire et moléculaire du Centre de l'énergie atomique (CEA) (*lire son portrait*, S. et A. n° 872). Le mécanisme résulte de la capacité qu'ont la plupart des cancers à envoyer des messages moléculaires à travers la circulation sanguine, voire le réseau lymphatique, pour transformer l'organisme en un environnement plus favorable à la prolifération tumorale. À l'inverse des processus métastatiques qui expédient des cellules cancéreuses pour coloniser de nouveaux organes *(lire texte ci-contre)*, il s'agit là de faire prendre à ces cellules le chemin inverse une fois la tumeur installée. Celle-ci utilise pour cela des « molécules d'appel » expédiées au cerveau afin de recruter des neurones. Une communication délétère que deux essais cliniques lancés aux États-Unis tentent de couper grâce à des bêtabloquants chez des patients atteints d'un cancer de la prostate.



INSERM/GUIMOND, DAMIEN

C'est dans le gyrus denté (partie la plus claire), situé dans l'hippocampe, région du cerveau impliquée dans la mémoire, que les tumeurs recrutent à distance des neurones appelés à former un système nerveux propre à la tumeur (ici, vus au microscope à fluorescence).

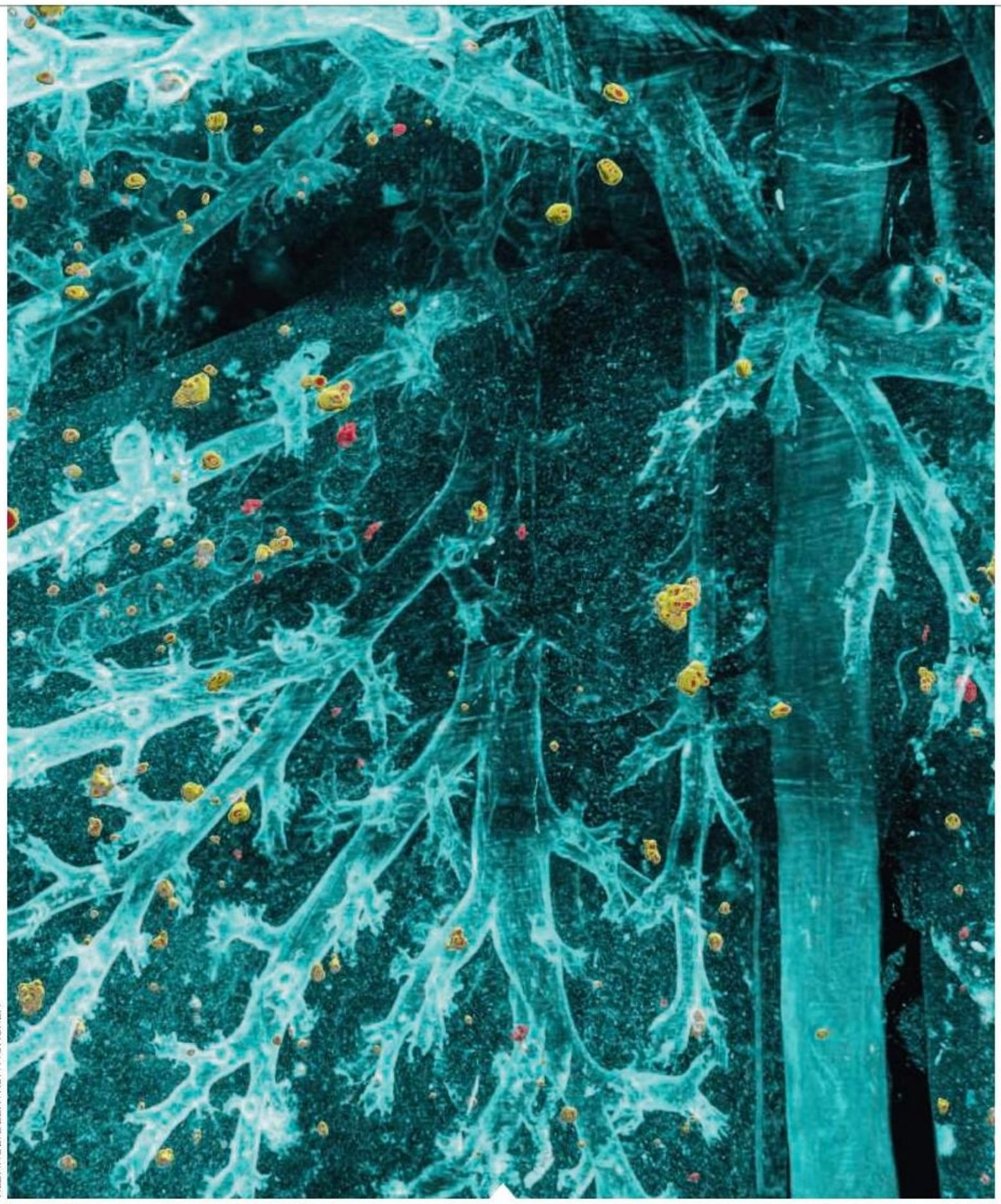
des CTC à la paroi vasculaire, et donc leur capacité à infiltrer les tissus. Et ils ont ainsi pu repérer leur cible : les capillaires, ces structures bien particulières du système sanguin, identifiées comme des zones privilégiées pour ces phénomènes biomécaniques. Il s'agit des plus fins et plus petits des vaisseaux sanguins, d'un diamètre de 10 micromètres, organisés en minuscules réseaux chargés d'oxygéner les tissus. Une observation directe qui conforte les chercheurs dans l'idée que les métastases se développent préférentiellement dans les organes les plus vascularisés (foie, cerveau, poumon).

Les résultats ont d'ailleurs pu être confirmés en collaboration avec des équipes allemandes auprès d'un groupe de 100 patients atteints de métastases cérébrales. « *Les capillaires sont des "points chauds" où le flux sanguin, ralenti, permet l'arrêt des CTC sans qu'elles soient détruites. Celles-ci doivent être équipées de protéines d'adhésion, sorte de "Velcro" qui leur permet de stabiliser cet arrêt, de survivre, puis de quitter la circulation sanguine et proliférer. C'est dans ces zones qu'une action thérapeutique ciblée pourrait être engagée pour empêcher l'arrêt des cellules circulantes ou leur attachement à la paroi et réduire ainsi le risque* », détaille Jacky Goetz.

Une fois « accrochée », une CTC mettra en effet entre deux et vingt-quatre heures pour parvenir à s'exfiltrer. Un véritable danger, même si, *in fine*, moins de 1 % des bataillons de cellules relâchés par la tumeur primaire parvient effectivement à « changer de place » selon l'étymologie grecque du terme (« meta-stasis »). Soit parce qu'elles sont détruites par les forces de cisaillement des flux sanguins, soit parce que nos cellules immunitaires, très présentes dans le sang, les reconnaissent et les ciblent.

Un algorithme pour localiser toutes les métastases

La dynamique des fluides mise en lumière par les chercheurs permet aussi d'expliquer pourquoi certains organes sont plus sujets aux métastases. « *Cet "organotropisme" est un phénomène multifactoriel, mais cette préférence est aussi orchestrée par l'architecture et l'orientation du réseau vasculaire : les organes touchés sont souvent les premiers irrigués par le sang issu de l'organe porteur de la tumeur primaire* », rappelle le chercheur. Parmi les autres facteurs, il faut citer la capacité des tumeurs à préparer, à distance, des niches métastatiques propices à l'implantation des CTC (*lire* S. et A. *n° 832, juin 2016*). Elles relâchent



HELMHOLTZ ZENTRUM MÜNCHEN

L'algorithme d'intelligence artificielle DeepMACT localise automatiquement les tumeurs, même au niveau cellulaire (ici en jaune et en rouge, dissémination métastatique observée dans un tissu pulmonaire de souris).

pour cela des « éclaireurs » (exosomes), organites de quelques dizaines de nanomètres chargées de modifier le microenvironnement des sites secondaires ciblés. Autre preuve des progrès en imagerie : la mise au point fin décembre d'un algorithme d'intelligence artificielle capable de localiser automatiquement l'ensemble des métastases cancéreuses sur un cliché, y compris celles encore au niveau unicellulaire. Une prouesse réalisée sur des souris. Ces travaux publiés en une de la revue *Cell* constituent une étape majeure du projet DeepMACT lancé par une équipe de l'Institut Helmholtz de génie tissulaire et de médecine régénératrice de Munich (Allemagne). Depuis 2016, ils collectent des données d'imagerie en utilisant des microscopes à balayage laser détectant jusqu'aux plus petites métastases présentes chez des souris « transparisées ». En effet, les chercheurs ont une stratégie bien particulière : à la mort des rongeurs, l'ensemble de l'organisme est rendu parfaitement transparent par un procédé chimique qui durcit le corps, préservant la structure des cellules. DeepMACT effectue alors en moins d'une heure la reconnaissance des images qui prenait des mois.

Sélectionner des molécules pour les essais cliniques

« *Pour développer des thérapies anticancéreuses plus efficaces, il est essentiel de comprendre les mécanismes métastatiques dans divers types de cancer afin de trouver des leviers spécifiques capables d'arrêter ce processus délétère,* explique Ali Ertürk qui a dirigé ces travaux. *Aujourd'hui, le taux de réussite des essais cliniques en oncologie est d'environ 5 %. DeepMACT peut considérablement améliorer la sélection de molécules dans la recherche préclinique.* » Et donc réduire le taux d'échec. En effet, la précision de l'algorithme constitue aussi un outil sensible pour l'évaluation thérapeutique des médicaments dans les études précliniques, sur modèles animaux.

Enfin, si la technique d'imagerie est difficilement transposable chez l'humain — car elle nécessite pour l'heure la mort du sujet — les connaissances acquises avec ce nouvel outil en libre accès pour la communauté scientifique devraient permettre d'apprendre à mieux détecter l'ensemble des petites métastases qui passent aujourd'hui inaperçues à l'examen clinique. ■

JACKY GOETZ

« Les capillaires sont des points chauds qui permettent l'arrêt des cellules tumorales sans qu'elles soient détruites »

Jacky Goetz, directeur de recherche Inserm de l'équipe Biomécanique des tumeurs à l'université de Strasbourg

Et si on mangeait des algues...

Ces « légumes » aquatiques possèdent des vertus nutritionnelles particulièrement intéressantes. À condition de vérifier leur provenance.

CONSOMMÉES DEPUIS DES MILLÉNAIRES en Extrême-Orient, les algues (dulse, nori, wakamé...) ont du mal à séduire les Occidentaux, sinon en accompagnement des sushis. « *Les consommateurs les associent encore aux marées vertes nauséabondes qui s'échouent sur certaines plages bretonnes*, confie Gérard Tremblin, professeur émérite de biologie et physiologie végétale à l'université du Mans. *De plus, manger des algues n'est pas inscrit dans notre culture. Une vingtaine de macroalgues seulement sont autorisées à la commercialisation en France, alors qu'il y en a plus de 50 au Japon.* » Mais depuis quelques années, la roue tourne en leur faveur. Les cheffes et chefs français ont su mettre en avant leur petit goût iodé raffiné. En paillettes, séchées ou fraîches, les microlagues sont aussi présentes dans les rayons à l'instar de la spiruline (*Arthrospira platensis*), une cyanobactérie vivant dans les eaux des lacs, plébiscitée pour sa richesse en protéines, en fer et en antioxydants.

Une classification selon leurs pigments

Leur appareil végétatif étant réduit à un thalle, les algues marines sont couramment classées selon la couleur de leurs pigments : vertes (chlorophycées), rouges (rhodophycées) et brunes (phéophycées). Toutes contiennent de la chlorophylle, un pigment qui permet la photosynthèse, mais certaines en renferment d'autres, en fonction de la profondeur à laquelle elles vivent, afin de capter au mieux les rayons lumineux qui leur parviennent. Les algues vertes, riches en chlorophylle, poussent en surface tandis que les brunes (wakamé, kombu), contenant de la fucoxanthine, et les algues rouges (nori, dulse), renfermant des phycobiliprotéines, s'épanouissent en eaux profondes (1).

En outre, les macroalgues contiennent des caroténoïdes (lutéine et zéaxanthine), des flavonoïdes (catéchines) ainsi que des vitamines C et E. La couleur

30 tonnes

de spiruline sont produites chaque année en France.

(SOURCE : FÉDÉRATION DES SPIRULINIERS DE FRANCE)

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

THALLE Appareil végétatif des plantes sans feuilles, tiges ni racines telles que les algues et les lichens.

PIGMENTS VÉGÉTAUX Ils absorbent certaines radiations lumineuses, dont la couleur varie selon la longueur, et renvoient les autres, notamment vers notre œil.

MACROALGUES Organismes vivants de grande taille (visibles à l'œil nu), le plus souvent aquatiques, capables de photosynthèse, par opposition aux microalgues, microscopiques.

bleutée de la spiruline est due à la phycocyanine.

Elles sont concentrées en iode

100 g de kombu breton, une variété locale, apportent 486 mg d'iode, soit 10 000 fois plus que les fruits de mer (2). Les macroalgues doivent donc être consommées avec parcimonie, pas plus de deux à trois cuillères à soupe par jour de paillettes, pour ne pas perturber le fonctionnement de la glande thyroïde ni favoriser l'hypertension artérielle. À noter que la spiruline n'en contient pas. Les algues constituent également un excellent apport en fer (6,15 mg pour 10 g de wakamé séché, 18 mg pour 10 g de spiruline), en magnésium (10 g de laitue de mer séchée en fournissent 278 mg, soit plus de 50 % des recommandations journalières) et en calcium (120 mg pour 10 g de laitue de mer séchée).

Elles pourraient diminuer le risque cardio-vasculaire

Les algues présentent des teneurs en lipides très faibles (1 à 7 % du poids sec) et certaines comme le wakamé constituent une source non négligeable d'acides gras polyinsaturés oméga 3, bénéfiques pour le cœur. En outre, les algues contiennent, selon les variétés, 28 à 50 % de fibres, lesquelles pourraient être particulièrement efficaces pour diminuer le cholestérol sanguin (3).

« *Les algues rouges et brunes contiennent par ailleurs dans leurs parois cellulaires des polysaccharides tels que les alginates, les carraghénanes et l'agar-agar, des fibres insolubles qui ne sont ni digérées ni assimilées, ce qui en fait des aliments très diététiques* », précise Gérard Tremblin. Compter 20 à 40 kcal/100 g pour les algues fraîches, 200 kcal/100 g pour les formes séchées.

La spiruline est la plus riche en protéines

Avec une teneur en protéines en moyenne de 57,5 g/100 g, deux fois supérieure à celle de la viande de bœuf (25,5 g/100 g), la spiruline procure à celui qui la consomme huit des 12 acides aminés essentiels qui doivent être fournis par l'alimentation. En revanche, la cyanobactérie « *ne constitue pas une source fiable de vitamine B12 pour la population végétalienne* », précise l'Agence nationale de sécurité des aliments (Anses) (4). « *Avec une teneur en protéines représentant 35 à 47 % de poids sec, les algues marines rouges telles que la dulse sont une source plus intéressante que certaines légumineuses comme le soja*, pointe Joël Fleurence, professeur en biologie des organismes et génétique à l'université de Nantes (lire aussi l'encadré). *Toutefois, la variabilité protéique dans un même groupe d'algues dépend en partie de son stade physiologique — selon que l'algue est jeune ou vieille — mais aussi, chez les algues rouges, de leur teneur en phycoérythrine, une protéine qui s'accumule à la fin de l'hiver et disparaît en été.* » Pour s'y retrouver, mieux vaut donc lire des ouvrages appropriés.

Choisir une spiruline cultivée en France

À la suite de plusieurs cas d'effets indésirables (troubles digestifs, allergies, atteintes musculaires ou hépatiques), l'Anses met en garde les consommateurs de compléments alimentaires à base de spiruline commercialisés en poudre, en pâte ou en comprimés. Et ce, en raison de traces de plomb, de mercure et d'arsenic. Elle peut être aussi contaminée par des cyanotoxines (microcystines) et des bactéries (4). « *La moitié de spiruline mise sur le marché a été produite en Chine* », met en garde Joël Fleurence. Mieux vaut donc choisir des produits portant la mention « *spiruline 100 % française* » ou « *cultivée en France* » qui font l'objet d'un contrôle strict. ■

Sylvie Boistard

(1) Les algues, une ressource aux applications multiples : nutrition, santé, cosmétologie, bioénergie, environnement, Gérard Tremblin, *Nutrition santé*, 2016.

(2) Table Ciqual, Anses, 2019.

(3) Dietary fibre from edible seaweeds : chemical structure, physicochemical properties and effects on cholesterol metabolism, Jimenez-Escrig A. et al, *Nutrition Research*, 2000.

(4) Compléments alimentaires à base de spiruline : privilégier les circuits d'approvisionnement les mieux contrôlés, Anses, 2017.

JOËL FLEURENCE Directeur adjoint de l'équipe « Mer, molécule, santé » à l'université de Nantes*

Avoir une connaissance précise des espèces avant de les récolter

« Les algues marines françaises commercialisées sont principalement collectées sur les côtes bretonnes, dans des zones réglementées et contrôlées selon des normes bactériologiques très strictes. Chacun peut aussi en faire une collecte personnelle, à une stricte condition : avoir une connaissance précise des espèces et de l'environnement, car les algues peuvent facilement être contaminées par des métaux lourds et des bactéries. Il faut donc impérativement exclure les zones portuaires et ne pas ramasser les algues échouées, qui pourrissent très rapidement. Il faut les récolter dans leur environnement naturel, une fois la mer retirée, en veillant à ce qu'elles soient encore attachées à leur substrat rocheux. »

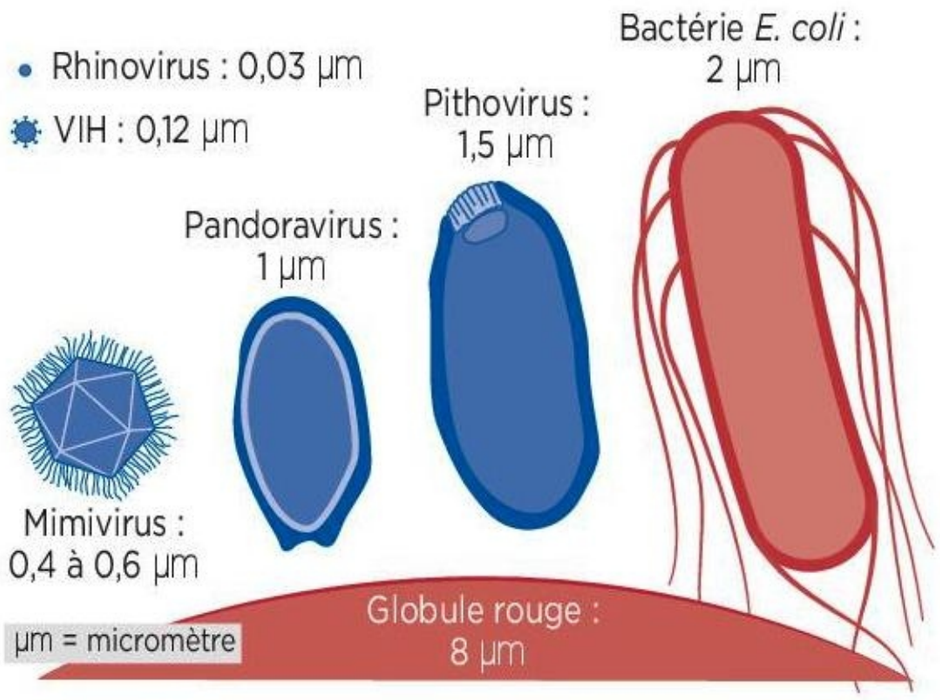
* Auteur des *Algues alimentaires, bilan et perspectives*, Lavoisier, 2018.

Les virus géants au cœur de l'évolution humaine

Noyau, ADN, placenta, mémoire… nous devons l'essentiel de ce qui nous constitue à des virus « géants » dont l'existence même est longtemps restée insoupçonnée.

C'EST PEU DIRE que les virus souffrent d'une mauvaise réputation : dangereux, vecteurs de maladies mortelles, ces organismes sont considérés comme une nuisance à éradiquer. Mais, pour certains biologistes, c'est tout l'inverse ! Non seulement ces entités auraient permis et accéléré l'évolution des organismes vivants mais il semble de plus en plus évident que, sans eux, les mammifères — et en particulier l'espèce humaine — n'existeraient tout simplement pas ! « *Nous sommes faits en partie de virus* », sourit Morgan Gaïa, de l'institut Pasteur à Paris, coauteur d'une étude récente publiée dans la revue *PNAS* démontrant leur importance originelle et primordiale pour tous les organismes évolués. Une découverte qui ouvre un champ de recherche aux implications insoupçonnées.

Voilà des années que certains chercheurs comme Patrick Forterre, de l'institut Pasteur à Paris, cosignataire de l'article de *PNAS*, ont la conviction que les virus ne sont pas simplement des pathogènes dangereux mais des acteurs essentiels de l'histoire du vivant. Mais il a fallu attendre la découverte des premiers « géants », il y a une quinzaine d'années, pour que les biologistes commencent à regarder d'un œil nouveau ces parasites. En 2003, l'équipe marseillaise de Didier Raoult mettait ainsi la main sur mimivirus, muni d'un génome de plus d'un million de bases… soit davantage que certaines bactéries. Il se trouve que mimivirus avait été isolé plus d'une décennie plus tôt dans une tour de refroidissement britannique, mais mis de côté… car justement confondu avec une bactérie. Il faut dire que l'idée même de l'existence d'un virus aussi imposant a longtemps tenu de l'anomalie voire de l'hérésie. Pourtant, mimivirus n'avait rien d'une exception. La preuve en a été apportée par la découverte, toujours à Marseille, par Chantal Abergel et Jean-Michel Claverie, respectivement directrice de recherche au CNRS et professeur à l'université d'Aix-Marseille, de pandoravirus. Celui-ci pulvérisait tous les records viraux avec son génome de 2,3 millions de bases.



Comparables aux bactéries par la taille, les virus géants possèdent un génome plus volumineux que certaines d'entre elles.

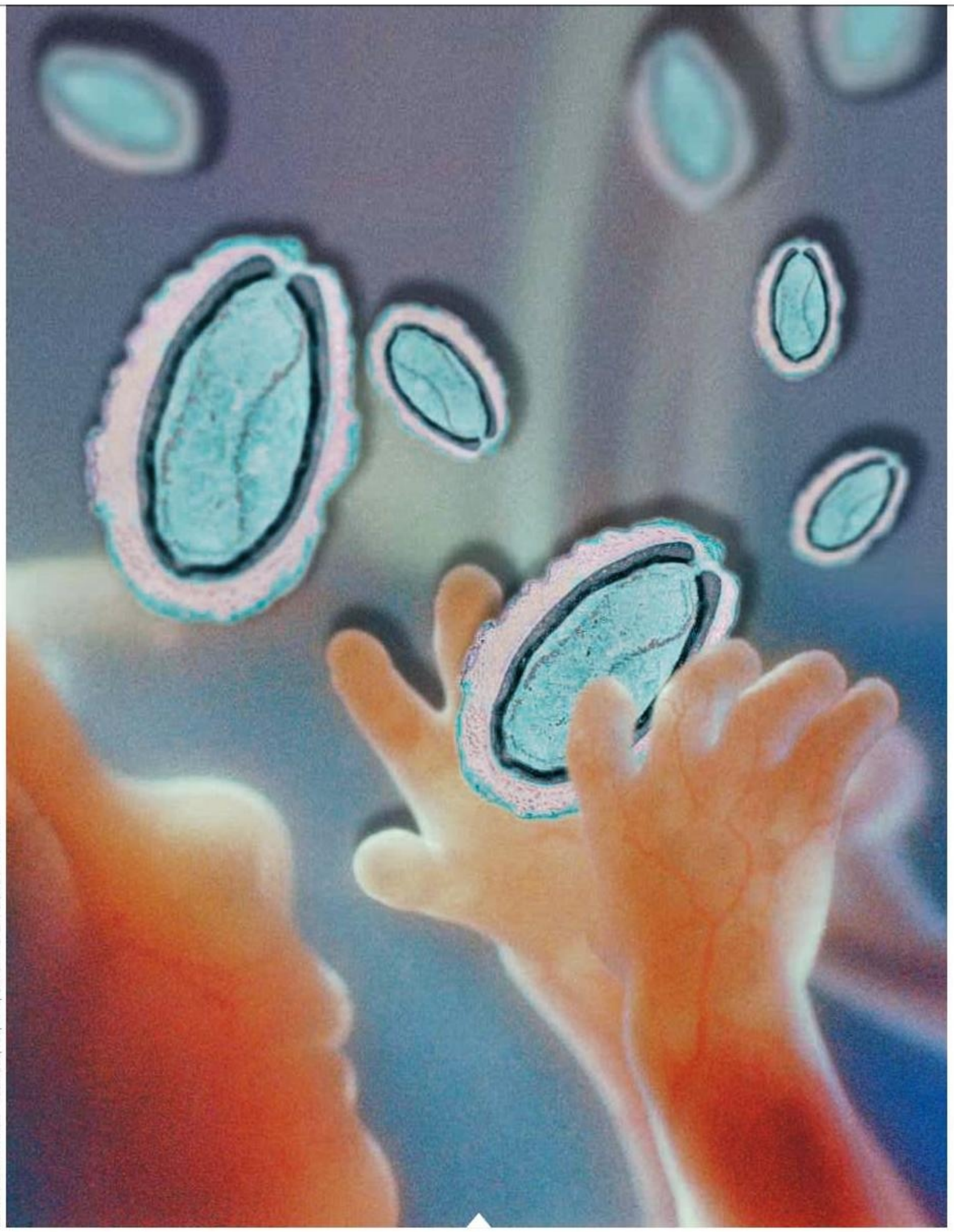
Des organismes qui peuvent tomber malades

Depuis, il se passe rarement six mois sans qu'un nouveau parasite géant soit déniché. « *Ils sont tellement abondants qu'on se demande comment il a été possible de passer à côté durant si longtemps !* » s'étonne Morgan Gaïa. Bien plus, ces trouvailles ont entraîné dans leur sillage la découverte d'organismes jamais vus, ni même envisagés jusqu'alors : les « virophages » — comme Sputnik ou Zamilon — autrement dit des virus infectant d'autres virus pour se répliquer. Ceux-ci ont remis en question l'idée selon laquelle ces organismes n'étaient pas vivants puisqu'ils ne pouvaient ni se faire infecter ni tomber malades. « *En ouvrant une fenêtre sur le passé, les virus géants ont bouleversé tout ce que l'on savait, ou croyait savoir, sur les virus* », résume Morgan Gaïa. Pour y voir plus clair dans le buisson désormais foisonnant de ces organismes, les chercheurs ont comparé les génomes de la

MORGAN GAÏA

« En ouvrant une fenêtre sur le passé, ils ont bouleversé tout ce que l'on savait, ou croyait savoir sur les virus »

Morgan Gaïa, chercheur en microbiologie à l'Institut Pasteur, à Paris



BERNARD MARTINEZ - ABERGEL/IGS/AMU/CNRS PHOTOTHÈQUE ET PHANIE

Le monde des cellules dont nous sommes constitués et celui des virus géants (ici, « Pandoravirus quercus ») entretiennent de nombreux liens (photo-montage).

soixantaine d'individus découverts jusqu'à présent et tenté de les placer dans le grand arbre phylogénétique du vivant. Plusieurs enseignements en ont découlé, dont certains totalement inattendus. Ainsi, ils seraient à l'origine de la diversification d'enzymes essentielles à la transcription de nos gènes et à la fabrication de nos protéines. En effet, les cellules eucaryotes (possédant un noyau), qui nous constituent, se distinguent par la présence dans leur arsenal de trois enzymes ARN polymérase différentes, alors que les bactéries et autres micro-organismes n'en possèdent qu'une. Jusqu'à présent, les chercheurs estimaient que ces deux enzymes supplémentaires provenaient d'une simple duplication du gène d'une ARN polymérase ancestrale. Or les nouvelles analyses réalisées par les chercheurs français révèlent qu'elles ont une origine bien différente : elles seraient issues d'un virus géant ayant infecté les ancêtres de nos cellules voilà plusieurs milliards d'années. Ces dernières auraient conservé ce trio d'enzymes qui leur auraient conféré un avantage évolutif par rapport à celles n'en détenant qu'une version. Ce qui permet aux chercheurs d'envisager l'hypothèse que les virus géants ne seraient rien de moins qu'à l'origine de l'apparition des cellules eucaryotes. En effet, lorsqu'ils infectent une cellule, les virus y édifient une sorte de bunker fermé, véritable « usine » à l'intérieur de laquelle sont tranquillement produites des répliques du virus (virions) qui *in fine* font exploser par leur nombre la cellule infectée. « *Or, les parois de cette "usine à virions" ressemblent beaucoup à celles de nos noyaux cellulaires* », décrit Morgan Gaïa.

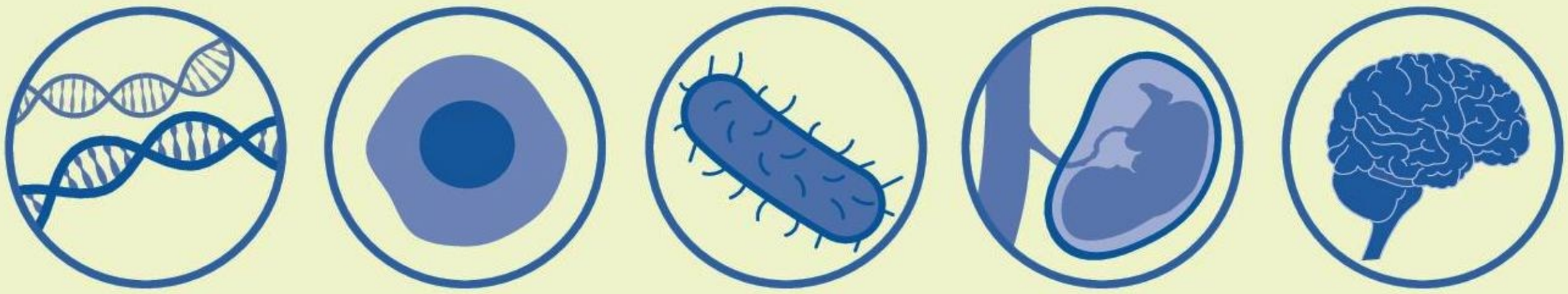
Une aventure commencée il y a 4 milliards d'années

L'apport des virus géants ne s'arrêterait pas là. Même la fameuse double hélice d'ADN, porteuse de l'information génétique, pourrait leur être redevable. « *Cela remonterait à un temps encore plus ancien, environ 4 milliards d'années, même si cet ordre de grandeur est encore très débattu* », poursuit le chercheur. À cette époque, où le matériel génétique des cellules vivantes était de l'ARN, une molécule plus simple et moins stable. Les virus auraient alors « inventé » l'ADN — une molécule proche de la précédente mais moins fragile —, dont ils auraient tiré un avantage sélectif. « *En remplaçant l'ARN par de l'ADN, les virus ont rendu leur matériel génétique résistant aux défenses alors mises en place par ses cibles cellulaires.* » Au fil du temps, les cellules auraient peu à peu récupéré ce matériel génétique à leur profit.

Mais le legs viral va bien au-delà de ces inventions cellulaires. Il ▸

ÉVOLUTION

Ce que les virus nous auraient légué



ADN

Un avantage évolutif

Avant que l'ADN ne s'impose comme support de l'information génétique chez les espèces évoluées, les génomes étaient constitués d'ARN. En adoptant l'ADN, une molécule plus stable, les virus ont acquis un avantage évolutif dont les mammifères, comme les êtres humains, ont hérité.

NOYAU

Le descendant d'une usine à virions

Lorsqu'ils infectent les cellules, les virus édifient une usine virale, leur permettant de fabriquer de très nombreux virions. Le noyau de nos cellules pourrait être un descendant de cette structure.

ARN

Des enzymes pour gérer nos gènes

Bactéries et archées n'utilisent qu'une seule enzyme ARN polymérase pour gérer leurs gènes. Les mammifères, dont les êtres humains, en ont trois dont deux proviendraient des virus géants.

PLACENTA

Des protéines anti-rejet

Nos organismes utilisent des protéines d'origine virale pour édifier le tissu placentaire permettant la nidation du fœtus et empêcher qu'il soit considéré comme du « non-soi » par l'organisme maternel et donc rejeté.

ARC

Une molécule pour la mémoire à long terme

Pour édifier et consolider notre mémoire à long terme, nos cerveaux ont recours à une protéine d'origine virale nommée ARC, dont la fonction précise reste à définir.

apparaît que nous leur devons également des gènes sans lesquels... nous n'existerions tout simplement pas ! Il existe en effet une classe de virus, les rétrovirus, capable d'insérer des portions de leur matériel génétique au sein de celui de leur hôte lorsqu'il l'infecte. Or, il arrive que ces gènes restent à demeure, continuent de fabriquer leurs protéines au seul profit de leurs hôtes, et qu'ils soient transmis aux descendants. Et pas n'importe quels gènes et protéines. Uniquement ceux qui nous singularisent en tant que mammifères et êtres humains. Ainsi, si nous possédons une mémoire à long terme, c'est notamment grâce à la protéine ARC. Cette dernière existe chez de nombreux animaux et participe à ce que l'on nomme la plasticité synaptique, cette capacité du cerveau à créer sans cesse de nouveaux réseaux. Lorsque des souris s'en trouvent dépourvues, elles perdent toute capacité à mémoriser.

Des gènes de mammifères et de virus très ressemblants

De surcroît, plusieurs maladies mentales humaines sont provoquées par un dysfonctionnement d'ARC. Deux études américaines, publiées récemment dans la revue *Cell*, ont établi une ressemblance frappante entre les gènes ARC des mammifères et les gènes GAG viraux qui servent à édifier leur enveloppe. Les chercheurs ont également démontré que les protéines ARC étaient capables de former spontanément des vésicules ressemblant à des capsides virales. Leur conclusion : ARC provient d'un virus ancestral et s'est adapté à son nouvel hôte en se trouvant cette fonction spécifique.

Un destin analogue à celui d'autres protéines virales, les syncytines, qui permettent aux virus de mieux infecter leurs proies en permettant à leurs enveloppes respectives de fusionner. Or, cette fusion cellulaire — transmise aux mammifères — prend une importance capitale au moment de la nidation du fœtus. À cette occasion, se forme un tissu placentaire qui permet non seulement à l'embryon de s'accrocher à la paroi utérine mais empêche également qu'il soit rejeté par le système immunitaire de la mère. Grâce à quoi le fœtus peut se développer et, tout simplement, naître ■ **Hervé Ratel**

BRUNO BOURGEOIS

Les ratés de l'expérience des « bébés CRISPR »

Des extraits d'un article non publié du chercheur chinois He Jiankui révèlent l'inanité de la manipulation au stade embryonnaire des jumelles Lulu et Nana.

He Jiankui voulait publier un article scientifique

Le *MIT Technology Review* a pu se procurer des extraits du manuscrit. Le chercheur en biophysique chinois y détaille les manipulations génétiques ayant conduit à la naissance, en 2018, de jumelles issues d'embryons modifiés par la technique d'édition du génome CRISPR-Cas9. Ces données avaient été soumises à au moins deux grandes revues : *Nature* et le *Journal of the American Medical Association* (*JAMA*). Aucune n'a donné suite en raison des problèmes éthiques posés par ces travaux.

Le chercheur chinois avait l'ambition de « contrôler l'épidémie de VIH »

C'est la seule justification que le chercheur a donnée pour expliquer pourquoi il avait développé une technique censée conférer aux bébés à naître une immunité contre le virus du sida. Celle-ci repose sur l'ajout d'une mutation (delta 32) du gène CCRS, dont environ 10 % de la population mondiale est naturellement porteuse, connue pour empêcher le VIH de se fixer aux cellules cibles. Or, les documents confirment qu'il n'y avait aucune raison médicale à cet essai. Si le père était séropositif, le risque de transmission du virus avait en effet été éliminé par une procédure courante de « nettoyage » des spermatozoïdes avant la FIV (fécondation *in vitro*).

AFP

Le biophysicien He Jiankui annonce le 28 novembre 2018 à Hong Kong la naissance des deux premiers bébés génétiquement modifiés au monde. Il a depuis été condamné.

C'est une forme inconnue du gène CCRS qui a été intégrée au génome

Elle est très similaire à delta 32, mais n'est pas identique. Or, avant l'intervention, le chercheur et son équipe n'ont pas pris la peine de tester *in vitro* la résistance potentielle au VIH des cellules ainsi modifiées. Impossible donc de savoir si cette mutation serait protectrice ou non. Les données génomiques exposées apparaissent alors en contradiction totale avec le « succès » dont se félicitent les auteurs dans le texte. Le séquençage ADN de tissus prélevés après la naissance des jumelles (placenta et cordon ombilical) montre que seule une partie des cellules embryonnaires présentent bien la mutation introduite.

La manipulation ne s'est pas parfaitement passée

Au moins une modification « hors cible » sur le génome est identifiée dans le document. En d'autres termes, l'insertion de la mutation a provoqué une modification collatérale dans une zone non ciblée de l'ADN. L'expérience pourrait en avoir provoqué d'autres. Mais pour le savoir, il aurait fallu détruire les embryons à implanter pour en examiner chaque cellule. Là, seule une cellule a été examinée.

He Jiankui a été condamné à trois ans de prison et 380 000 euros d'amende

Motif annoncé par le gouvernement chinois fin décembre 2019 : pratique illégale de la médecine. Deux autres chercheurs, Zhang Renli et Qin Jinzhou, ont également été condamnés respectivement à 2 ans et 18 mois de prison. Ce sont ces deux spécialistes de l'embryologie et de la reproduction qui ont procédé à l'injection des mutations dans les embryons. Rien n'a filtré concernant les sept autres signataires de cet article. ■

Hugo Jalinière

@HugoJaliniere

La charge mentale, importante source de stress, peut conduire jusqu'à un syndrome de burn-out.

GETTY

5 questions pour apprivoiser le stress

Apprendre à en repérer les signes et limiter ses effets sur notre organisme est essentiel si l'on veut diminuer les risques à long terme pour notre santé.

Par Émilie Gillet, avec Agence Forum News

VIVRE SANS STRESS relève de la mission impossible dans notre société hyperconnectée. Serait-ce d'ailleurs un objectif réaliste ? Et déjà un objectif en soi ? Le stress ne peut-il pas avoir aussi quelques avantages ? Pour le savoir, mieux vaut être capable d'en reconnaître les signes. Car la première victime du stress, c'est notre santé.

1 Comment fonctionne le stress ?

ACCÉLÉRATION DES RYTHMES cardiaque et respiratoire, augmentation du tonus musculaire, élévation de la pression sanguine, des taux de sucre et de matières grasses dans le sang, ralentissement de l'activité digestive, exacerbation de la transpiration... Par le biais du cerveau, de l'activation du système nerveux autonome (qui contrôle de nombreuses fonctions de l'organisme en dehors de notre volonté) et de sécrétions hormonales de type adrénaline et cortisol, le stress est une réponse physiologique de notre organisme à des éléments extérieurs qui viennent perturber son équilibre. Et si l'espèce humaine est sensible à cet état de tension, c'est que cela représente un certain avantage : les effets immédiats nous permettent de faire face à un danger, de réagir vite et de fuir si besoin. Et dans certaines situations, cela peut encore nous être très utile !

Source : étude OpinionWay, oct. 2017

2 Pourquoi est-il dangereux quand il devient chronique ?

LES PROBLÈMES LIÉS au stress se produisent essentiellement quand celui-ci atteint un stade chronique : lorsque les effets biologiques perdurent, il y a une augmentation du risque de maladies chroniques, ou d'exacerbation de pathologies préexistantes. Il s'agit par exemple de fatigue et douleurs musculaires, d'aggravation d'affections pulmonaires comme l'asthme ou l'insuffisance respiratoire, du diabète ou d'une maladie de peau, d'une fragilisation des parois artérielles, de troubles digestifs... Une vaste étude coordonnée par des chercheurs suédois et islandais, parue en avril 2019 dans la revue *The British Medical Journal*, a aussi montré que les réactions de stress graves sont liées à un risque accru de plus de 60 % de plusieurs types de maladies cardio-vasculaires (hypertension, accident vasculaire cérébral, infarctus du myocarde...).

synergia®

Laboratoire de médecine nutritionnelle

D-Stress®, votre allié contre le stress.

N°1
SUR LE MARCHÉ DU STRESS*

1 Français stressé sur 3 choisit D-Stress®.*

NOUVEAU
La gamme D-Stress® s'agrandit.
Pour vos nuits sereines,
D-Stress® sommeil.

Le stress incessant de la vie quotidienne altère le métabolisme énergétique, l'équilibre du système nerveux et les fonctions psychologiques, occasionnant un état de fatigue physique et intellectuelle. Chassez la fatigue et retrouvez la sérénité avec **D-Stress®** !

D-Stress® agit rapidement contre le stress, sans accoutumance.

Disponible en **comprimés** ou en **sachets solubles ultra-concentrés** avec **D-Stress® Booster**.

Dosage recommandé : 3 à 6 comprimés **D-Stress®** dans la journée, à moduler selon les besoins, ou 1 sachet **D-Stress® Booster** le matin au petit-déjeuner. En cas d'urgence, 1 sachet **D-Stress® Booster** ou 4 comprimés **D-Stress®** en une prise, pour une amélioration en 30 minutes.

L'acide pantothénique (vitamine B5) contribue à retrouver des performances intellectuelles normales (résistance au stress[1]). Le magnésium et les vitamines B2, B3, B5, B6, contribuent au métabolisme énergétique et à réduire la fatigue[2].

DEMANDEZ CONSEIL À VOTRE PHARMACIEN. **D-Stress®** 80 comprimés, code ACL 764 19 43.
D-Stress® Booster 20 sachets, code ACL 513 68 79. **D-Stress® SOMMEIL** 40 comprimés, code ACL 3760139290518.

INFORMATION CONSOMMATEUR AU **04 77 42 30 10**
Retrouvez nos offres sur **www.synergiashop.com**.

*Chiffres Gers année 2018 ; D-Stress® et D-Stress® booster N° 1 en CA, sur le marché du stress en pharmacie avec 32,4% de part de marché. AP_D-stress&Booster_Synergia® 2020 - ©Istock.fr.

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE. WWW.MANGERBOUGER.FR

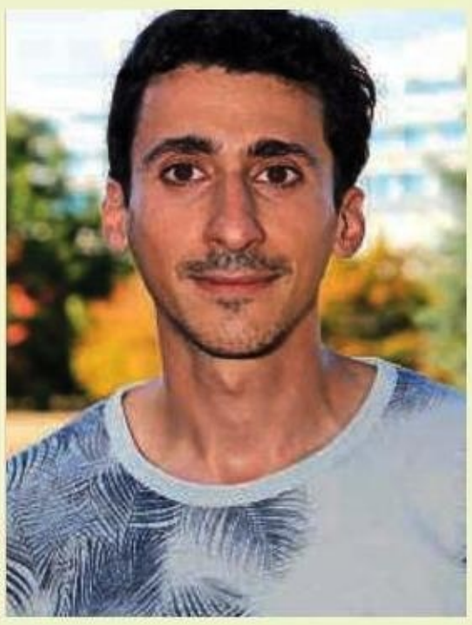
INTERVIEW

OUSSAMA ABDOUN
CHERCHEUR AU CENTRE DE RECHERCHE EN NEUROSCIENCES DE LYON

« La méditation n'est pas une pilule miracle ! »

La méditation permet-elle de diminuer le stress ?
Pour le stress de la vie quotidienne, les personnes qui la pratiquent témoignent d'une diminution de celui-ci après la participation à un programme de méditation. Les effets moyens sont faibles, mais avec une grande variabilité entre les individus et les études. Pour ce qui est des troubles post-traumatiques, la méditation de pleine conscience* aurait un effet positif comparable aux thérapies classiques.

Comment expliquer une telle variabilité des effets ?
Les attentes et les préjugés des participants ont une influence sur les bénéfices qu'ils peuvent tirer de la méditation. De plus, dans les études, les participants sont toujours en groupe, guidés par un enseignant.


O. ABDOUN

Il est donc difficile de distinguer les effets « groupe » et « guide » des effets spécifiques à la méditation. De nouvelles études se saisissent de cette question. Silver Santé Study par exemple, une étude européenne à laquelle nous participons, s'intéresse à l'effet de la méditation sur le « bien vieillir » en comparant un groupe qui médite collectivement et un groupe qui prend des cours d'anglais (*lire* S. et A. *n° 875*).

Que penser de la tendance actuelle à recommander la pratique quotidienne de la méditation ?
La méditation ne doit pas être envisagée comme une pilule miracle ! Prescrire de la méditation, ce serait comme une sorte d'injonction au bien-être tout à fait contre-productive. C'est reporter sur les individus la responsabilité quasi exclusive de leur stress et oublier que la société doit aussi apporter des réponses collectives. ■ **Recueilli par É. G.**

* La méditation de pleine conscience, très médiatisée ces dernières années, se caractérise par une attitude calme, où le corps est au repos et la pensée ouverte aux sensations, idées et émotions de l'instant présent, sans aucun jugement ni attente particulière.

3 Quels en sont les signes ?

Il existe de nombreux signaux qui peuvent alerter quand le problème devient trop régulier ou répétitif. Ces symptômes peuvent être différents selon les sensibilités individuelles et les périodes de la vie. Il s'agit par exemple de simples signaux physiologiques comme une fatigue accrue, des troubles du sommeil, ou une somatisation importante (mal de dos, de ventre, maux de tête...) Les manifestations peuvent être émotionnelles avec de l'inquiétude, une anxiété ou une impatience inhabituelle, une perte de contrôle des émotions... Les indices sont aussi d'ordre cognitif comme des problèmes de concentration, des troubles de la mémoire ou comportementaux avec, par exemple, des problèmes d'addiction (alcool, tabac, nourriture...), un repli sur soi, une désorganisation ou des changements des habitudes personnelles. La fréquence, la durée et surtout le cumul de ces symptômes sont des critères très importants pour déterminer un niveau de risques pour la santé.

4 Comment éviter le burn-out ?

Il n'est pas toujours possible de supprimer les sources de stress, mais l'on peut limiter ses effets négatifs sur l'organisme en apprenant à reconnaître ses manifestations, et en agissant directement sur son corps par différents moyens : la respiration abdominale par exemple, si elle est pratiquée régulièrement, est un très bon moyen pour reprendre le contrôle et diminuer la réponse physiologique au stress à l'instant T ; des techniques de visualisation mentale (imaginer une situation ou un lieu agréable par exemple) peuvent aussi être utiles. À plus long terme, la pratique régulière d'activités physiques douces (yoga, marche...) permettrait, selon certains praticiens, de reprendre contact avec ses sensations physiques et de diminuer les risques de pathologies qui sont habituellement associées au stress chronique. Enfin, il ne faut pas négliger l'effet d'un bon bol de nature ! D'après une étude américaine parue en avril 2019 dans *Frontiers in Psychology*, pour les personnes vivant en ville, passer vingt minutes par jour au grand air, dans un parc, un jardin ou une allée bordée d'arbres serait suffisant pour réduire le taux de cortisol, une hormone liée au stress.

5 Peut-on traiter le stress post-traumatique ?

Après un choc psychologique violent, comme un accident de la route, une agression ou une catastrophe naturelle, certaines personnes développent un syndrome de stress post-traumatique. Reviviscence de l'événement, évitement des situations ou des personnes qui rappellent ce trauma, dépression, troubles du sommeil... Les symptômes sont très divers. Les thérapies cognitivo-comportementales (TCC) sont des psychothérapies courtes et ciblées qui visent à modifier les pensées et les comportements problématiques en confrontant par exemple le patient aux souvenirs, images ou objets à l'origine du choc, en utilisant les jeux de rôle, en mobilisant la parole... Elles présentent des résultats intéressants pour traiter le syndrome de stress post-traumatique. Selon la gravité des symptômes, un traitement antidépresseur peut aussi être envisagé conjointement. ■ **Émilie Gillet**

PUBLICITÉ

Télomères et longévité

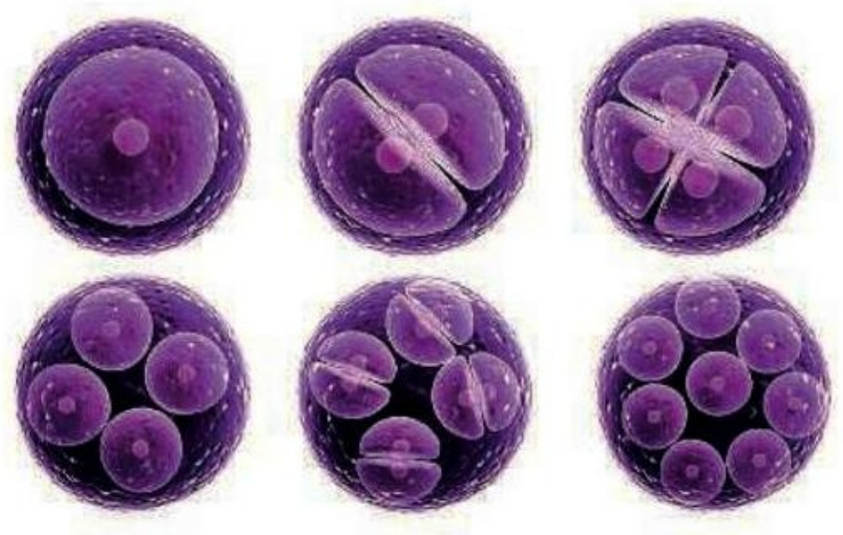
En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).

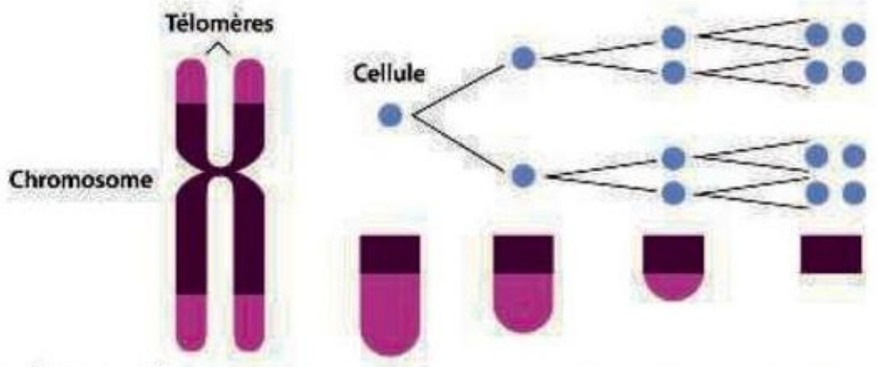
Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes



Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase



Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

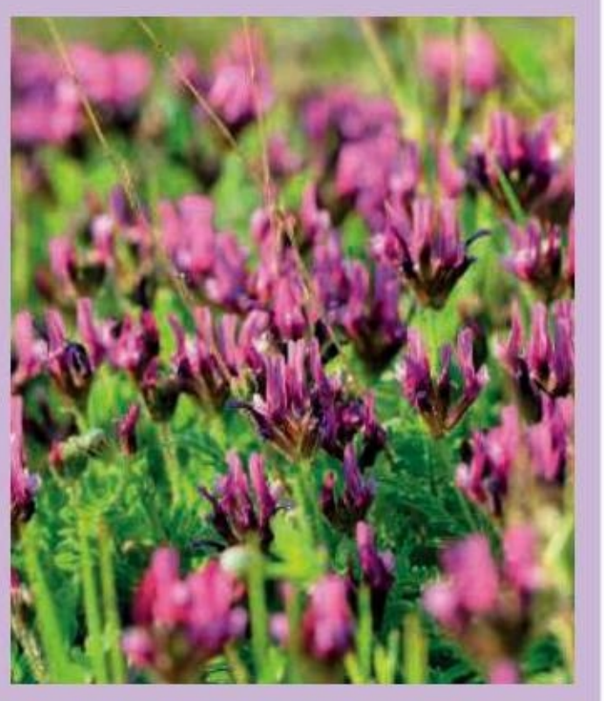
Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par provoquer la mort de la cellule, appelée sénescence.

Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales.

Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

Astragale et télomères,

Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifiques. Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffisent pour constater une diminution significative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.



Disponible en pharmacie et espace diététique

Telomerys
60 gélules végétales
ACL 6024256
Des questions ?
Les experts du Laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au 01 85 42 36 19 (tarif local) et sur **www.telomerys.com**.

Sur une proposition du ministre de la ville et du logement, Julien Denormandie, c'est un beau cadeau que le gouvernement et Action logement font en 2020 aux français de plus de 70 ans.
Constatant que l'âge venant, la chute dans la salle de bains peut être mortelle, ils proposent de prendre en charge jusqu'à 5.000€ par foyer* pour la rénovation de leur salle de bains. Un vrai cadeau !

Pour en savoir plus

DOUCHES « DENORMANDIE »

par

Kinemagic

Le rénovateur français de la salle de bains

Tel : 0800 05 06 07. (appel gratuit) | kinemagic.fr
Adresse : Kinedo. 9 rue de Rouans. 44680 Chaumes-en-Retz

(*) sous réserve de certaines conditions

La transition environnementale sera au cœur des enjeux des prochaines décennies. Les cursus d'ingénieur(e)s s'adaptent à ce nouveau défi.

Devenir ingénieur(e) POUR CHANGER LE MONDE

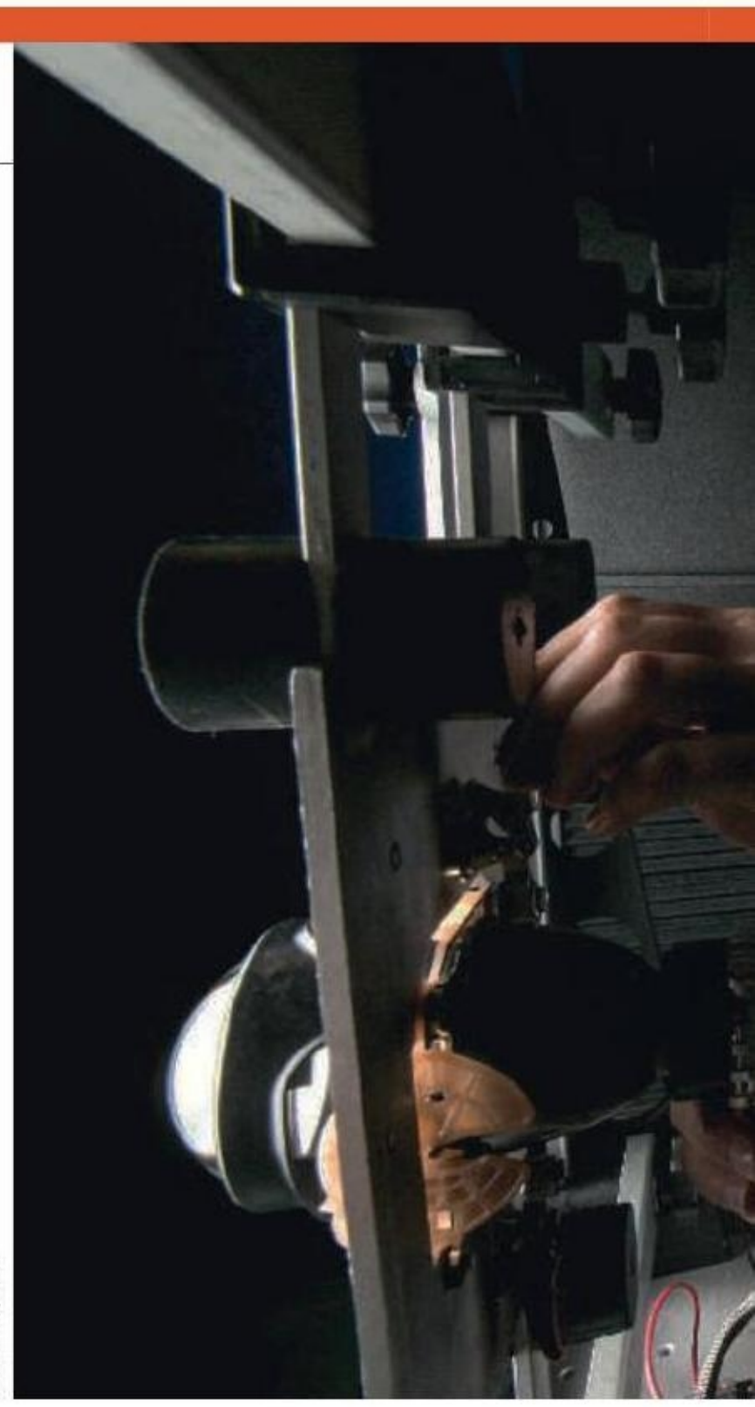
Numérique, santé, environnement... « Sciences et Avenir » a sélectionné sept secteurs où les besoins en ingénieur(e)s sont forts pour construire les technologies du futur.

Dossier réalisé par
Sylvie Lecherbonnier

ANTOINE DENOUAND/REA

Des emplois pour aujourd'hui et demain

Les jeunes diplomé(e)s n'ont aucune difficulté à trouver un poste et faire carrière. Une situation qui devrait durer au vu des défis technologiques à relever.



HAMILTON/REA

Méthodologie

Les tableaux qui figurent dans ce dossier ont été établis à partir des recommandations des responsables de cursus et des recruteurs interrogés. Ils visent à donner des exemples de formations à la pointe des évolutions en cours et ne constituent en aucun cas un palmarès. Les options ou dominantes indiquées sont le plus souvent à choisir en fin de parcours.

Les ingénieur(e)s* ne connaissent pas la crise. D'année en année, leur insertion professionnelle ne se dément pas. 67 % de celles et ceux ayant obtenu leur diplôme en 2018 avaient trouvé un emploi avant même l'obtention du précieux sésame, selon la dernière enquête de la Conférence des grandes écoles. Huit sur dix ont signé un CDI directement après leurs études, pour un salaire moyen brut annuel primes comprises qui dépasse 38 000 euros. Une « employabilité » qui se poursuit tout au long de leur carrière, le taux de chômage global ne dépassant pas les 3,3 %, bien loin des 8,5 % pour l'ensemble de la population française. « *Nous diplômons environ 38 000 personnes chaque année mais nous pourrions délivrer 10 000 titres de plus, étant donné les besoins des entreprises* », constate Jacques Fayolle, directeur de Télécom Saint-Étienne et président de la Conférence des directeurs des écoles françaises d'ingénieurs (CDEFI). Le nombre d'étudiantes et d'étudiants inscrits dans cette filière ne cesse de croître : plus de 17 % en cinq ans. Si les classes préparatoires restent la principale voie d'accès (38 % en proviennent), les 200 écoles habilitées par la Commission des titres d'ingénieur (CTI) ouvrent de plus en plus de cycles préparatoires intégrés et proposent des places aux bacs +2/+3. En parallèle de ces cursus, une nouvelle offre voit le jour qui donne accès à des emplois de niveau ingénieur : les cursus master en ingénierie (CMI). Il en existe une centaine, formant près de 3000 personnes en cinq ans après le bac au sein des universités. Les masters en sciences et technologies constituent aussi une alternative.

12 nouvelles professions identifiées

Cette bonne insertion professionnelle ne semble pas près de s'arrêter. « *Les besoins vont rester importants,* analyse Laurent Champaney, directeur général de l'École nationale supérieure d'arts et métiers à Paris.

FORMATIONS

Parcoursup 2020 : c'est l'heure des vœux

Parcoursup, c'est parti ! Les élèves de terminale ont jusqu'au 12 mars pour formuler au maximum 10 vœux de formations supérieures, sans les hiérarchiser. Ils pourront compléter leurs dossiers jusqu'au 2 avril. Les réponses des établissements s'étaleront entre le 19 mai et le 17 juillet, ce qui générera donc des vœux « en attente » jusqu'à la clôture de cette période. Écoles d'ingénieur(e)s post-bac, prépas et CMI (cursus master en ingénierie) font partie des filières sélectives. Les premières se sont pour la plupart regroupées en grands concours communs (Avenir, Geipi-Polytech, Puissance Alpha...), qui représentent chacun un vœu. Les facs de sciences sont ouvertes à tous, sous réserve des capacités d'accueil. L'année 2021 devrait introduire de nouveaux changements avec l'entrée en vigueur du nouveau bac général. Chaque filière du supérieur est en train d'adapter ses procédures d'admission à cette nouvelle donne. Attention : pour les écoles d'ingénieur(e)s, la spécialité « mathématiques » devrait être exigée à l'entrée.

Entreprises et écoles multiplient les initiatives pour qu'il y ait davantage de femmes ingénieures.

MIXITÉ

Femmes demandées !

Près de 40 000 femmes ont étudié dans une école d'ingénieur(e)s en 2018-2019. Soit 28 % des effectifs, alors qu'elles représentent 47 % des élèves en terminales scientifiques. Dans le détail, les filles ne sont majoritaires que dans les filières « agro » et « chimie » et sont à peine 17 % dans les cursus numériques et 15 % dans les formations orientées transports. Écoles et entreprises multiplient les initiatives pour parvenir à plus de mixité mais les stéréotypes ont la vie dure. Ainsi, l'association Elles bougent sillonne la France avec ses marraines pour faire découvrir les métiers d'ingénieur(e)s aux collégiennes et lycéennes. Isabelle Collet, enseignante-chercheuse spécialiste de l'inclusion des femmes dans le numérique, estime qu'*« il faudrait aller vers des quotas transitoires le temps de faire évoluer la situation »*. Une idée qui ne convainc pas les écoles. Pour Jacques Fayolle, président de la Conférence des directeurs des écoles françaises d'ingénieurs (CDEFI), *« les réformes du bac et des études de santé vont permettre de faire bouger les lignes en ouvrant l'éventail des possibilités »*. À vérifier d'ici à quelques années…

D'un côté, la transition numérique est loin d'avoir fini de produire ses effets. De l'autre, la transition écologique nécessite de travailler sur des verrous scientifiques et technologiques. » Le numérique va être porteur de croissance. 232 000 recrutements, dont 90 500 créations d'emplois, étaient prévus entre 2017 et 2027 par l'Observatoire paritaire métiers du numérique, de l'ingénierie, des études et du conseil. L'essor de l'IA va être une source de débouchés. Les projections d'emplois sur la transition énergétique et environnementale sont plus floues mais elle sera au cœur des enjeux des prochaines décennies. « *La prise de conscience des entreprises est récente : elles sont encore démunies pour calibrer leurs demandes* », constate Laurent Carraro, consultant sur l'industrie du futur. Des emplois dont les jeunes, en quête de sens, sont en demande. Laurent Champaney en est persuadé : « *Les entreprises n'auront bientôt plus le choix. Nos élèves, de plus en plus investis sur le sujet, ne voudront plus travailler dans des sociétés qui ne respectent pas leurs valeurs.* »

> « Nous pourrions diplômer 10 000 ingénieur(e)s de plus par an »
>
> **Jacques Fayolle,** président de la Conférence des directeurs des écoles françaises d'ingénieurs (CDEFI)

Les écoles font évoluer leur cursus pour répondre à ce défi. Le Cesi s'est ainsi associé à l'Association pour l'emploi des cadres (Apec) pour définir les métiers du futur dans l'industrie et le bâtiment : ingénieur(e) en efficacité énergétique, en cobotique (collaboration humain-machine) ou en IA… 12 nouvelles professions ont été identifiées. « *Les métiers évoluent très vite, de même que les compétences. Ces études nous permettent de préparer des réponses à ces transformations* », affirme Belahcène Mazari, directeur recherche et innovation du Cesi, qui réfléchit par exemple à un mastère spécialisé sur l'industrie 4.0. De même, Mines ParisTech, qui n'avait pas fait de réforme d'ampleur depuis plus de vingt ans, a présenté une nouvelle maquette entrée en vigueur en septembre 2019. « *Trois thématiques se sont dégagées : la transition numérique, la transition énergétique et environnementale et la santé. Autrement dit, les grands challenges qui attendent nos diplômés pour les 30 prochaines années* », détaille Matthieu Mazière, le directeur des études. Pour relever ces défis, le nouveau cursus met l'accent sur l'international, les projets pluridisciplinaires et l'entrepreneuriat. Dénominateur commun de ces démarches : le poids grandissant des compétences comportementales (*soft skills*) dans les formations, en parallèle des connaissances scientifiques. Savoir travailler en équipe ou gérer un projet devient essentiel dans un monde en mutation. ■

* La place des femmes étant primordiale dans ces cycles de formation, nous mettons volontairement l'accent sur cette féminisation nécessaire.

NUMÉRIQUE

Des débouchés à foison

Les spécialistes des données font partie des profils les plus demandés dans le numérique. Intelligence artificielle et cybersécurité sont des secteurs particulièrement porteurs.

LE SECTEUR DU NUMÉRIQUE a créé 34 000 emplois en 2018, selon l'organisation professionnelle Syntec numérique, qui regroupe 2000 entreprises. Neuf recrutements sur dix se font à des niveaux bac +4/+5, dont un grand nombre d'ingénieur(e)s.

● IA ET DONNÉES MASSIVES

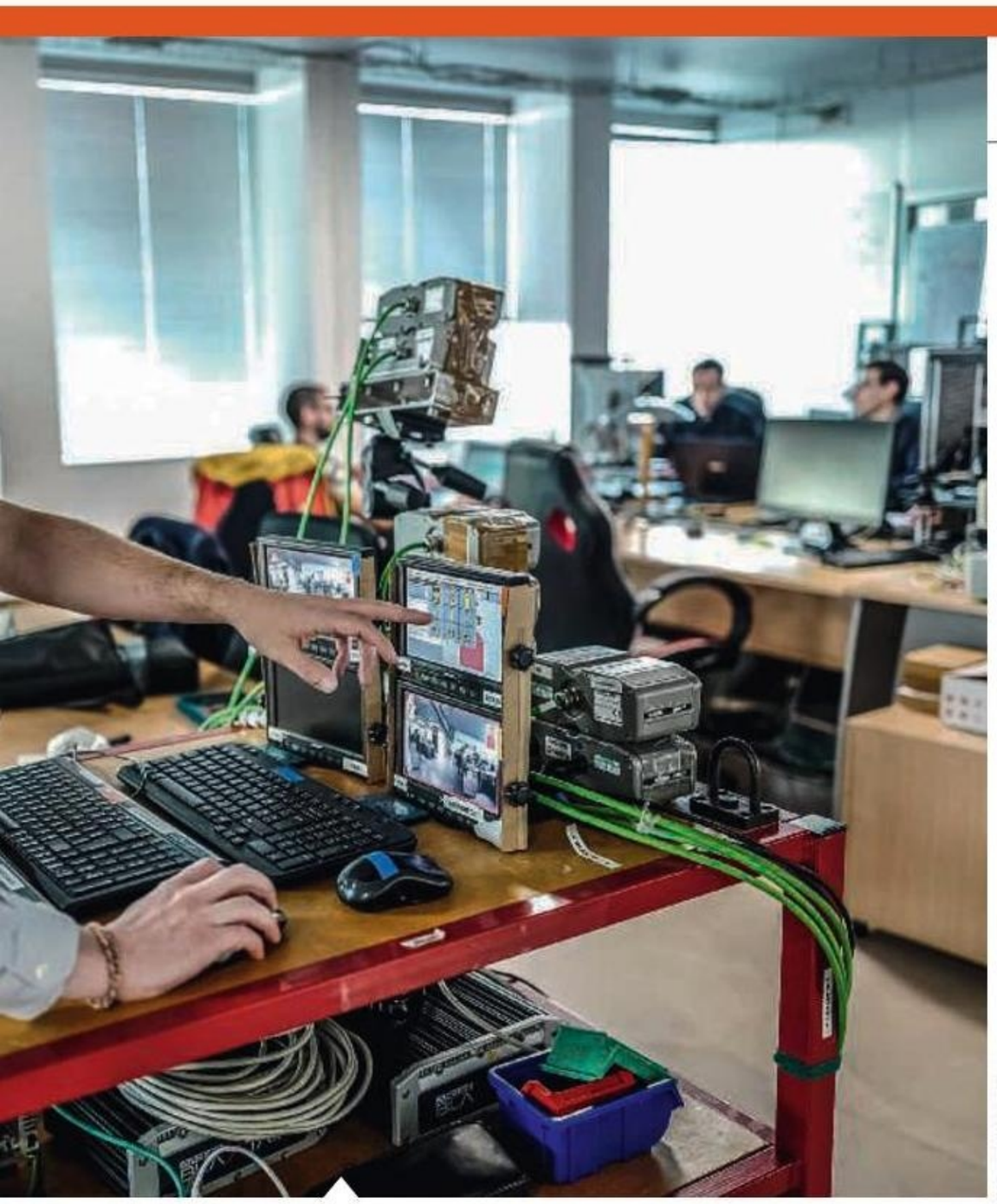
Des outils en vogue

« *Savoir faire parler les données, les stocker, les capter, les sécuriser, créer des modèles prédictifs à partir de leur collecte… Les données massives* (big data) *sont au cœur des métiers du numérique aujourd'hui* », assure Christelle Pradier, directrice de l'attractivité des talents chez Sopra Steria. Les données et les outils d'intelligence artificielle (IA) qui permettent leur analyse font partie des expertises les plus en vogue parmi les 3800 postes à pourvoir dans cette entreprise en 2020. Le Syntec numérique, syndicat professionnel du numérique, évalue, lui, à 7500 les créations nettes d'emploi dans les cinq prochaines années rien que pour l'IA. Face à ces besoins, « *l'offre de formation est de qualité mais reste insuffisante* », selon Neila Hamadache, déléguée à la formation au Syntec Numérique pour qui il faudrait former 2500 personnes par an rien que pour les entreprises adhérentes à son organisme. Bertrand David, directeur de la formation initiale de Télécom Paris, confirme cette croissance : « *Environ un(e) diplômé(e) sur cinq travaille dans le domaine de l'intelligence artificielle. Si on élargit les débouchés aux données massives et à l'apprentissage automatique* (machine learning) *appliqué à d'autres secteurs, c'est la quasi-totalité de la promotion qui est employée dans ces domaines. Ne pas traiter des données devient l'exception dans le numérique.* »

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET BIG DATA

École/université	Ville	Intitulé du diplôme	Niveau d'entrée*	Durée	Coût**
CentraleSupélec	Paris-Saclay/ Rennes/Metz	ingénieur (dominante informatique et numérique - IA)	après bac +2	3 ans	3500 €
ENSAI	Rennes	ingénieur (spécialisation statistique et ingénierie des données)	après bac +2	3 ans	1850 €
ESILV	Paris La Défense	ingénieur (majeure data et intelligence artificielle)	après bac	5 ans	8900 €
Télécom Paris	Paris/Palaiseau/ Sophia-Antipolis	ingénieur	après bac +2	3 ans	2650 €
Télécom Saint-Étienne	Saint-Étienne	ingénieur data engineering (contrat d'apprentissage)	après bac +2	3 ans	0 €
Université Grenoble-Alpes et Grenoble INP	Grenoble	master MOSIG (Master of science in informatics at Grenoble) - parcours Artificial intelligence and the web	après bac +3	2 ans	243 €
Université Paris-Dauphine	Paris	master 2 Informatique - Parcours IASD (Intelligence artificielle, systèmes, données)	après bac +4	1 an	243 €

* Premier niveau d'entrée dans la formation. ** Frais de scolarité en euros pour une année de formation au niveau master.



XAVIER POPY/REA

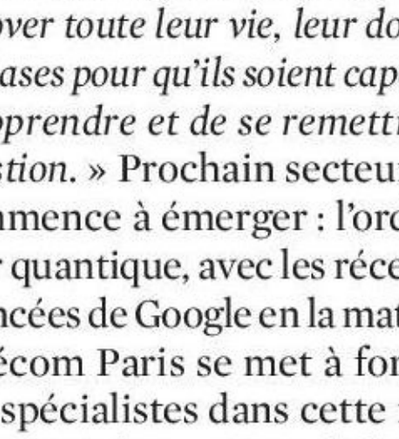
L'offre de formation à la maîtrise des outils de l'IA et de l'exploitation des données massives reste insuffisante par rapport à la demande croissante des entreprises.

● CYBERSÉCURITÉ

Expert(e)s recherché(e)s

La cybersécurité draine aussi beaucoup d'emplois. Le nombre d'offres a doublé entre 2016 et 2018 sur le site de l'Apec (Association pour l'emploi des cadres). *« Avec la montée en puissance des objets connectés, les problématiques liées à la sécurité informatique ne sont pas près de diminuer »*, prédit Bertrand David. Christelle Pradier renchérit : *« Tout projet du numérique comporte un volet sûreté. »* Là encore, les ingénieur(e)s informatique raflent la mise, mais des certifications spécifiques en cybersécurité peuvent être exigées. Or, ces spécialisations peuvent *« ne représenter que quelques heures de cours supplémentaires dans les cursus, ce qui ne permet pas toujours de saisir l'intégralité des technologies et problématiques liées à la cybersécurité »*, regrette l'experte. Son entreprise, Sopra Steria, organise ainsi des *bootcamps* (cursus d'entraînement) pour ses jeunes recrues afin de compléter leurs connaissances. L'État est également à la recherche de spécialistes en cyberdéfense. Le gouvernement travaille depuis l'été 2019 sur une étude de faisabilité d'un campus de la cybersécurité pour renforcer les synergies entre acteurs publics, privés et « académiques », et susciter des vocations. Orange et Thalès, côté entreprises, et l'Epita, côté écoles, sont impliquées.

Pour Bertrand David, quel que soit le domaine du numérique, *« les usages et les technologies évoluent très rapidement. Les écoles doivent former des ingénieur(e)s qui vont innover toute leur vie, leur donner les bases pour qu'ils soient capables d'apprendre et de se remettre en question. »* Prochain secteur qui commence à émerger : l'ordinateur quantique, avec les récentes avancées de Google en la matière. Télécom Paris se met à former des spécialistes dans cette nouvelle discipline. *« Nous diplômons cinq ingénieur(e)s par an,* confie l'enseignant-chercheur Romain Alleaume. *La plupart poursuivent en thèse et se retrouvent aux quatre coins du monde. »* Le numérique n'a pas fini de recruter. ■



> « Les données massives sont au cœur des métiers du numérique aujourd'hui »
>
> **Christelle Pradier,** directrice de l'attractivité des talents chez Sopra Steria

CYBERSÉCURITÉ

École/université	Ville	Intitulé du diplôme	Niveau d'entrée*	Durée	Coût**
EPITA	Paris, Lyon, Rennes, Strasbourg, Toulouse	ingénieur (majeure « systèmes, réseaux et sécurité »)	après bac	5 ans	9178 €
ENSEEIHT - ENAC - INSA Toulouse	Toulouse	mastère spécialisé « sécurité informatique »	après bac+5	1 an	9000 €
ENSEIRB-MATMECA	Bordeaux	ingénieur informatique (option « cybersécurité, réseaux et réseaux »)	après bac+2	3 ans	601 €
ENSIBS	Lorient/Vannes	ingénieur (cyberdéfense)	après bac	5 ans	601 €
Télécom SudParis	Évry/Palaiseau	ingénieur (approfondissement « sécurité des systèmes et des réseaux »)	après bac+2	3 ans	2650 €
Université de Limoges	Limoges	master informatique Cryptis	après bac+3	2 ans	243 €
Université de Rennes 1	Rennes	master informatique parcours cybersécurité	après bac+3	2 ans	243 €

* Premier niveau d'entrée dans la formation. ** Frais de scolarité en euros pour une année de formation au niveau master.

ENVIRONNEMENT

CYRIL FRESILLON/CEREEP/CNRS PHOTOTHÈQUE

Guider les collectivités et organismes dans le changement des pratiques agricoles est une des nouvelles facettes du métier d'ingénieur agronome.

La transition écologique s'amorce

De nouvelles formations se montent pour répondre aux enjeux environnementaux.

« SCIENCES POUR LES DÉFIS de l'environnement » à l'École polytechnique, « ingénierie de la transition écologique » à Centrale Nantes... Des cursus pluridisciplinaires se développent sur les questions environnementales et se déclinent dans différents secteurs. Si pour Clémence Vorreux, référente enseignement supérieur au *think tank* The Shift Project, formations et débouchés ne sont pas encore à la hauteur des enjeux, *« il n'y a pas beaucoup d'autres formations que celles d'ingénieur(e)s qui peuvent avoir une vision systémique des problèmes que pose le dérèglement climatique »*.

● BÂTIMENTS

Les nouveaux métiers de l'efficacité énergétique

Transitions numérique et écologique se rejoignent dans le BTP (bâtiment et travaux publics). Maquettes en 3D avec l'essor du BIM (*building information modeling*), capteurs du sol au plafond pour mettre en place des carnets numériques d'entretien... De nouvelles compétences sont nécessaires. Les offres d'emploi de *BIM manager* ont ainsi été multipliées par 1,7 entre 2016 et 2018 selon l'Apec. De nouvelles normes poussent par ailleurs les entreprises à améliorer l'efficacité énergétique de leurs bâtiments. Là aussi, le nombre d'offres d'emploi d'ingénieur(e)s spécialisé(e)s s'est envolé ces deux dernières années. *« Plus les jeunes que nous embaucherons seront formés aux enjeux environnementaux, plus ils seront des acteurs du changement dans nos entreprises »*, estime ainsi Laure Ducoulombier, responsable de la chaire construction 4.0 chez Bouygues Construction. De quoi voir fleurir les intitulés « construction durable » et « génie énergétique » dans les cursus des ingénieurs BTP.

● ÉNERGIE

La recherche-développement en action

Au cœur de la transition écolo-

BÂTIMENT

École/université	Ville	Intitulé du diplôme	Niveau d'entrée*	Durée	Coût**
Centrale Lille	Lille	ingénieur (parcours « construction et matériaux durables »)	après bac+2	3 ans	2500 €
CESI École d'ingénieurs	Angoulême, Brest, La Rochelle, Montpellier, Rouen, Strasbourg	ingénieur BTP (contrat d'apprentissage à partir de la 3e année)	après bac	5 ans	0 €
ESTP Paris	Paris, Troyes, Dijon	ingénieur en génie énergétique de la construction durable (contrat d'apprentissage)	après bac+2	3 ans	0 €
HEI	Lille, Châteauroux	ingénieur (domaine « smart cities »)	après bac	5 ans	8550 €
Insa Rouen	Rouen	ingénieur « génie civil et constructions durables »	après bac	5 ans	601 €

* Premier niveau d'entrée dans la formation. ** Frais de scolarité en euros pour une année de formation au niveau master.

ÉNERGIE

École/université	Ville	Intitulé du diplôme	Niveau d'entrée*	Durée	Coût**
École polytechnique	Palaiseau	ingénieur (approfondissement « énergie du XXIe siècle »)	après bac+2	4 ans	0 €
ICAM	Nantes	mastère spécialisé éco-énergie	après bac+5	1 an	9500 €
INSA Strasbourg	Strasbourg	ingénieur génie climatique et énergétique	après bac	5 ans	601 €
Mines ParisTech	Paris, Sophia-Antipolis	mastère spécialisé « énergies renouvelables »	après bac+5	1 an	7500 €
Université de Franche-Comté	Belfort	CMI « énergie hydrogène efficacité énergétique »	après bac	5 ans	243 €

*Premier niveau d'entrée dans la formation **Frais de scolarité en euros pour une année de formation au niveau master

gique, les enjeux énergétiques donnent lieu à de nombreux enseignements depuis une quinzaine d'années. « Énergies du XXIe siècle », « éconergies », « énergies renouvelables », les spécialisations ne manquent pas. « *Une dimension pluridisciplinaire se révèle de plus en plus essentielle pour comprendre les ressorts de la transition énergétique et son acceptation par la société* », note Matthieu Mazière, directeur des études de Mines ParisTech. L'école a ainsi ajouté des cours sur « *terre et société* » en première année. En parallèle, de nouvelles formations ultra-spécialisées voient le jour, comme à l'université de Franche-Comté qui propose depuis cinq ans un CMI (cursus master en ingénierie) sur l'énergie hydrogène. « *Les jeunes commencent après le bac sur un cursus sciences de l'ingénieur avant de se focaliser sur l'hydrogène au fur et à mesure des années* », souligne Maxime Jacquot, responsable de ce CMI de « niche » qui compte 5 à 10 étudiants par promotion et attire les entreprises : une formation en alternance va être proposée à partir de la rentrée 2020. Côté recrutement, la R&D et les bureaux d'études, qui concentrent près de 40 % des emplois des jeunes ingénieur(e)s tous secteurs confondus, sont friands de ces différents profils.

> « Plus les jeunes seront formés aux enjeux environnementaux, plus ils seront des acteurs et des actrices du changement »
>
> **Laure Ducoulombier,** responsable de la chaire construction 4.0 chez Bouygues Construction

● AGRICULTURE

Le boom de l'agroécologie

Dans les champs aussi, l'heure est à la transition. « *Une école d'agronomie ne peut plus se permettre d'enseigner une agriculture conventionnelle. Nous sommes arrivés au bout d'une manière de produire*, affirme Claude Compagnonne, directeur adjoint d'Agrosup Dijon. *Il faut arriver à changer les pratiques, notamment sur l'utilisation des pesticides, sans pour*

autant casser les systèmes de production. » Au sein des chambres d'agriculture ou des collectivités, les ingénieur(e)s agronomes ont un rôle à jouer pour accompagner chacun dans cette transition. C'est pourquoi Agrosup Dijon, comme d'autres écoles d'agronomie, a revu son cursus pour amplifier sa dimension écologique. Deux dominantes en sont nées, entre autres : « ressources, données, diagnostics et changements climatiques » et « agro-écologie pour des productions végétales durables ».

J.C. MOSCHETTI/HEUDIASYE/CNRS PHOTOTHÈQUE

Les innovations sans cesse apportées aux véhicules impliquent d'avoir une vision globale pour concevoir de nouvelles infrastructures.

● TRANSPORTS

De nouvelles mobilités à imaginer

Énergie et transports sont plus que jamais étroitement liés. Le véhicule électrique en est l'illustration. *« Il ne s'agit pas seulement d'une innovation technologique mais d'une innovation de rupture*, analyse Éric Feunteun, directeur du programme véhicule électrique chez Renault. *Le véhicule électrique, comme bientôt le véhicule autonome, nécessite la mise en place d'un "écosystème" pour savoir où et comment installer les bornes de recharge par exemple. Une fine compréhension des usages devient cruciale.* » Le mastère spécialisé IRVE (manager de projets en infrastructures de recharge et véhicules électriques), l'une des rares formations spécialisées sur la voiture électrique, est ainsi dispensé de concert par Arts et métiers Paris, l'Ensta et Mines ParisTech. *« Aucune école n'avait à elle seule toutes les compétences nécessaires »*, confie Philippe Degobert, son responsable. Face à ces évolutions, les doubles compétences énergie-automobile, ville-automobile sont particulièrement prisé(e)s. Bienvenue dans l'ère de la mobilité ! ■

AGRICULTURE

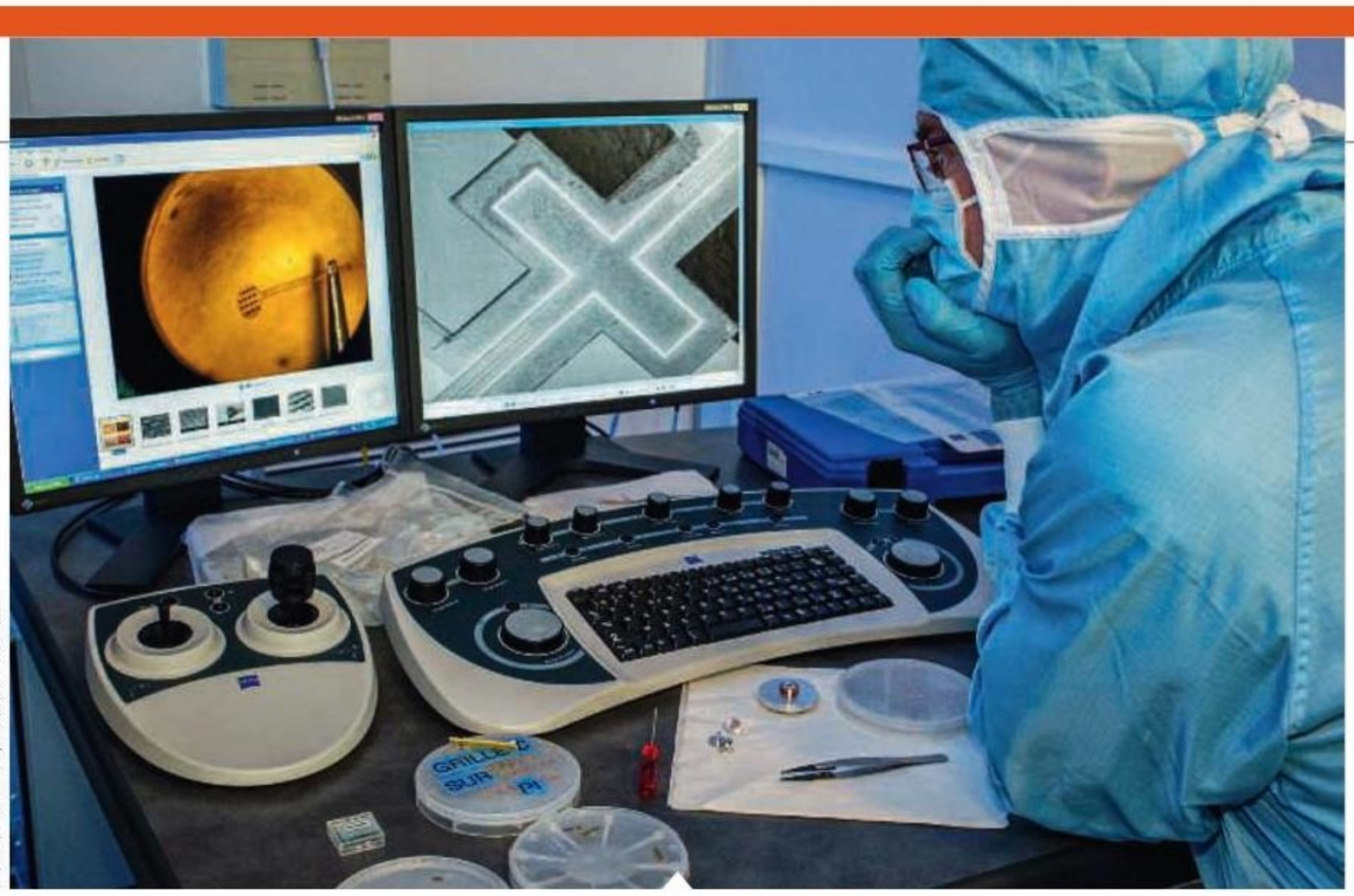
École/université	Ville	Intitulé du diplôme	Niveau d'entrée*	Durée	Coût**
Bordeaux Sciences Agro	Bordeaux	ingénieur (filières animales durables)	après bac+2	3 ans	1765 €***
AgroParisTech	Paris/Grignon	ingénieur (domaine « gestion et ingénierie de l'environnement »)	après bac+2	3 ans	1765 €
Agrosup Dijon	Dijon	ingénieur (dominante "ressources, données, diagnostics, changements climatiques")	après bac	5 ans	1765 €
ISA Lille	Lille	ingénieur (domaine « sustainable agriculture and smart farming »)	après bac	5 ans	7000 €
Unilasalle	Beauvais, Rennes, Rouen	master of science « agriculture urbaine et villes vertes »	après bac+3	18 mois	8200 €

* Premier niveau d'entrée dans la formation. ** Frais de scolarité en euros pour une année de formation au niveau master. *** Possibilité de faire une partie de la formation en apprentissage donc sans frais de scolarité.

TRANSPORTS

École/université	Ville	Intitulé du diplôme	Niveau d'entrée*	Durée	Coût**
Arts et Métiers Paris, Mines ParisTech et Ensta	Paris/Lille	mastère spécialisé IRVE (Infrastructures de recharge et véhicules électriques)	après bac+5	1 an	12500 €
École des Ponts ParisTech	Marne-la-Vallée	ingénieur (parcours ville, environnement, transports)	après bac+2	3 ans	3090 €
EIGSI	La Rochelle	ingénieur (dominante énergie et environnement - mobilités durables)	après bac	5 ans	7150 €
ISAE-Supaéro	Toulouse	ingénieur (domaine énergie, transports, environnement)	après bac+2	3 ans	2800 €
ISAT	Nevers	ingénieur (énergétique, propulsion, électronique, environnement)	après bac	5 ans	601 €

* Premier niveau d'entrée dans la formation. ** Frais de scolarité en euros pour une année de formation au niveau master.



PATRICIA LATRON/LOOKATSCIENCES

Le secteur médical connaît une révolution avec l'arrivée de technologies de pointe (ici une rétine artificielle).

« La double compétence santé-ingénierie s'avère un sésame pour l'emploi »

Stéphane Roques,
délégué général du pôle de compétitivité Médicen

SANTÉ

Les profils hybrides recherchés

Biotechnologies, robotique et big data assurent des débouchés importants dans le domaine de la santé.

LES ENTREPRISES DE SANTÉ franciliennes prévoient de créer 3500 emplois d'ici à 2021, selon la dernière enquête du pôle de compétitivité Medicen Paris Région, parue en novembre 2019. Si les profils R&D (recherche-développement) restent centraux, les métiers liés aux données massives (*big data*)seront en forte croissance, selon cette étude. *« Trois révolutions touchent le secteur médical et font se rapprocher métiers de la santé et de l'ingénierie : une meilleure connaissance du vivant, l'arrivée de l'intelligence artificielle et la miniaturisation, avec les implants connectés, par exemple »*, souligne Stéphane Roques, délégué général de Medicen. *« Les entreprises sont en recherche de profils hybrides, imprégnés des enjeux de santé, de la connaissance du patient et rompus aux technologies de pointe »*, note le pôle de compétitivité.

Les écoles d'ingénieur(e)s l'ont bien compris. Elles ouvrent de plus en plus d'options ou de spécialisations liées au médical. Stéphane Roques en est convaincu : *« La double compétence santé-ingénierie s'avère un sésame pour l'emploi. »* À Polytech Angers, le cycle « génie biologique et santé » attire ainsi un tiers de la promotion, soit 70 personnes par an. Elles se dirigent ensuite vers l'ingénierie des produits de santé, la gestion des risques voire la gestion de structures type Ehpad ou hôpital. *« Nous réfléchissons évidemment à faire des ponts avec notre autre spécialité "génie informatique" »*, confie Laurent Bordet, chargé des relations extérieures de l'établissement. Sans avoir de spécialité en tant que telle, Télécom Saint-Étienne, une école d'ingénieur(e)s axée sur le numérique, compte, elle, entre 30 % et 40 % de sa promotion qui se dirige vers le secteur de la santé. La réforme du premier cycle des études de santé devrait encore amplifier cette tendance avec la multiplication des passerelles entre ces deux filières de l'enseignement supérieur. ■

École/université	Ville	Intitulé du diplôme	Niveau d'entrée*	Durée	Coût**
Aix-Marseille université	Marseille	CMI « immunologie »	après bac	5 ans	243 €
Centrale Nantes	Nantes	ingénieur (option « sciences du numérique pour les sciences de la vie et la santé »)	après bac+2	3 ans	2500 €
IMT Albi	Albi	ingénieur (option « bio santé ingénierie »)	après bac+2	3 ans	2150 €
Polytech Angers	Angers	ingénieur (spécialité « génie biologique et santé »)	après bac	5 ans	601 €

* Premier niveau d'entrée dans la formation. ** Frais de scolarité en euros pour une année de formation au niveau master.

Le sésame des serrures connectées

De nouveaux dispositifs connectés permettent de déverrouiller une porte à l'aide d'un smartphone, rendant ainsi possible des ouvertures ciblées et temporaires. La sécurité est assurée par un logiciel de cryptographie.

REMETTRE UNE CLÉ virtuelle valable pour une durée limitée à un livreur ou à un hôte pour une location de courte durée, vérifier que ses enfants sont bien rentrés après leur journée d'école et bien sûr déverrouiller la porte d'entrée sans contact physique : toutes ces opérations sont désormais réalisables à distance, à l'aide d'une application sur smartphone. Seule condition, remplacer son ancienne serrure par un dispositif connecté. Coût de l'opération : entre 150 et 800 euros environ.

Ces dispositifs électromécaniques « intelligents » sont les héritiers des systèmes à badge utilisés dans les entreprises ou l'hôtellerie depuis une vingtaine d'années et qui reposaient initialement sur une gestion centralisée des serrures à l'échelle de l'ensemble du bâtiment. Désormais, ils peuvent être actionnés sans carte, à distance, grâce à un téléphone. La dématérialisation est totale puisque ce sont des clés virtuelles, échangées par une liaison sans fil, qui déclenchent l'ouverture.

BRUNO BOURGEOIS POUR S. ET A.

150 à 800 euros
Le coût du remplacement d'une serrure traditionnelle par un dispositif connecté.

Apparus il y a quelques années aux États-Unis, ces dispositifs ont récemment été adaptés aux modèles européens de serrures. Remplacer le barillet classique par un modèle intégrant un module de contrôle électronique est une opération simple, qui ne nécessite que quelques minutes. Une vingtaine de fournisseurs parient sur le décollage du marché des particuliers d'ici à deux ans, dopé notamment par l'essor de la livraison à domicile et des locations de courte durée. Les serrures connectées ont d'ailleurs fait partie des technologies phares du CES, le salon de l'électronique grand public, qui s'est tenu en janvier à Las Vegas.

La technologie Li-Fi arrive sur le marché

Reste à rassurer les utilisateurs sur la sécurité de telles solutions. Celle-ci est liée non seulement aux propriétés mécaniques du cylindre, généralement comparables à celles d'une serrure traditionnelle, mais aussi et surtout au logiciel de cryptographie utilisé pour créer les clés virtuelles *(lire l'encadré)* et au mode de communication choisi pour les transmettre. Le Bluetooth et le NFC (Near Field Communication, une technologie de communication sans fil à courte distance) sont les plus fréquemment choisis. Une serrure actionnée par Li-Fi sera commercialisée cette année, le signal étant émis en lumière visible par le flash du téléphone tenu devant la porte. Avantage : il est impossible à un pirate de récupérer un tel signal lumineux en se plaçant à proximité immédiate du domicile, comme c'est le cas pour un signal radio.

Autre facteur de différenciation : la durée de vie des batteries des serrures. Pour les préserver, certains systèmes laissent à l'utilisateur le soin de les actionner mécaniquement par la poignée, le moteur n'ayant alors que la responsabilité de rendre cette action possible en déverrouillant l'ensemble. L'autonomie passe ainsi de quelques mois à trois ans. D'autres explorent les apports de faibles sources d'énergie comme de petits panneaux solaires, ou cherchent à optimiser le fonctionnement de leurs dispositifs pour limiter leur consommation. Enfin pour se rassurer, certains préféreront un modèle qui conserve un système mécanique pour pouvoir l'ouvrir en toutes circonstances... ■

Muriel de Véricourt

CRYPTOGRAPHIE

Un chiffrement de haute sécurité

Pour éviter les effractions, les fabricants de serrures connectées misent sur la cryptographie. Les modèles les plus sécurisés recourent à la norme AES 256, utilisée pour les communications bancaires. Un serveur génère des clés de chiffrement dont la validité est limitée dans le temps (quelques secondes à quelques minutes), qui ne font que transiter par le smartphone et ne peuvent être décryptées que par la serrure. Une précaution indispensable : en 2016, deux experts américains en sécurité informatique avaient réussi à pirater 16 des 18 serrures qu'ils avaient testées, notamment parce que certaines recevaient un mot de passe non crypté adressé par le smartphone en Bluetooth. Plus récemment, deux autres spécialistes ont réussi à déverrouiller des serrures d'hôtel en modifiant les codes encryptés sur des badges RFID.

Quand le smartphone fait office de clé

Un panneau solaire améliore l'autonomie de certains modèles.

Le cylindre fourni par le fabricant de la serrure connectée remplace celui de la porte d'origine. Il intègre une partie mobile, le panneton, actionnée automatiquement par le moteur qui entraîne l'ouverture de la porte. Le cylindre peut aussi être équipé d'un accéléromètre qui détecte les vibrations générées par une tentative d'intrusion.

La carte mère intègre un récepteur Bluetooth ou NFC et un processeur. Si la clé cryptée reçue est valide, un module de contrôle se charge de déclencher le moteur.

Les piles qui alimentent le moteur ont une longévité de huit mois à trois ans environ selon les modèles.

Les tringles solidaires du pêne (non représentées sur cette illustration), qui assurent la sécurité des serrures 3, 5 ou 7 points, peuvent également être entraînées par le moteur, moyennant un surcroît d'énergie.

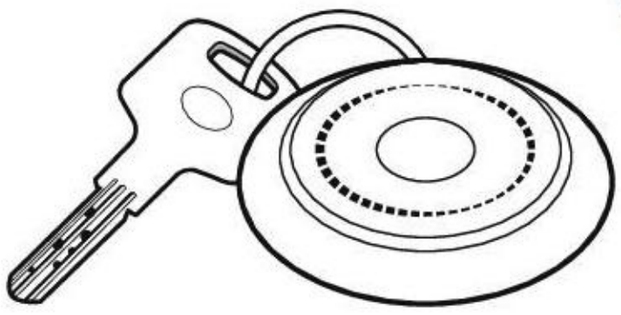
Le smartphone reçoit du serveur du fabricant une clé cryptée, qu'il émet à son tour en direction de la serrure. Celle-ci la décode pour en vérifier l'authenticité.

Un pavé numérique est installé par certains fabricants en complément de la liaison avec le smartphone pour assurer l'ouverture en toutes circonstances. Le code peut être changé à volonté et à distance.

Les données de suivi de l'activité sont transmises par le réseau Wi-Fi de la maison à l'utilisateur, qui peut ainsi être informé à distance sur les entrées et les sorties.

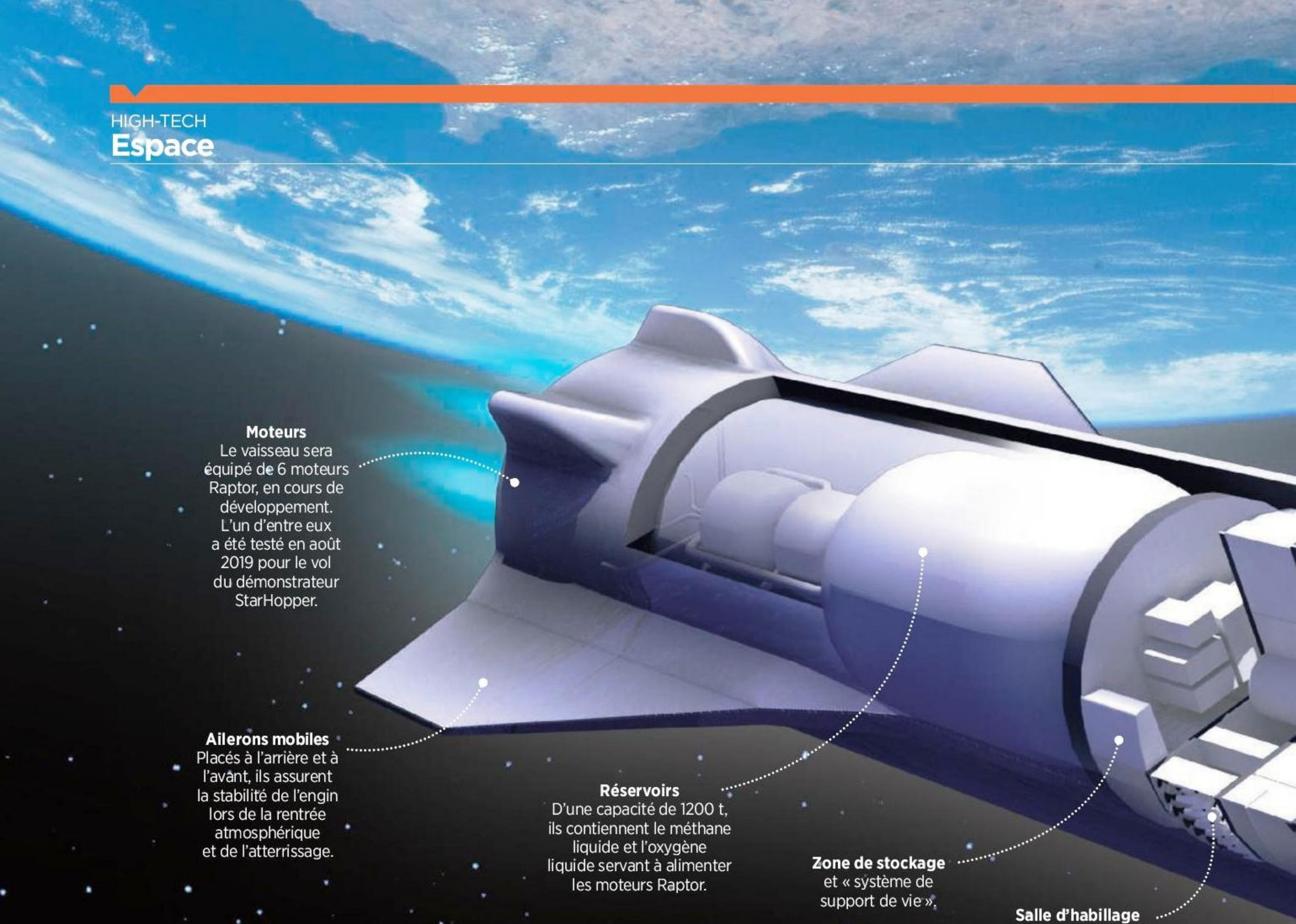
Certains modèles peuvent aussi être ouverts avec...

Une empreinte digitale du propriétaire.



Une vraie clé quand le mécanisme physique de la serrure reste fonctionnel.

Un badge intégrant des clés numériques cryptées, mais qui peut être désactivé en cas de perte.



Le tourisme spatial prend forme

SpaceX pourrait lancer cette année Starship, la fusée « la plus puissante jamais réalisée », destinée à emporter un jour de riches voyageurs et du fret vers la Lune ou Mars...

MEHDI BENYEZZAR POUR SCIENCES ET AVENIR - NASA

L'ENGIN SEMBLE droit sorti d'un film de science-fiction. Pourtant, le nouveau vaisseau Starship de la société américaine SpaceX devrait réaliser son premier vol d'essai cette année et des vols commerciaux à partir de 2021. Composé d'un lanceur super-lourd et du vaisseau à proprement parler, ce système de transport est conçu pour acheminer des équipages et du fret en orbite terrestre puis vers la Lune, Mars *« et au-delà »*, selon Elon Musk, le patron de SpaceX. Tous les segments de Starship seront réutilisables, ce qui promet de réduire le coût des voyages lunaires et martiens. D'autant plus que le vaisseau quittera le sol avec un minimum de carburant, ses réservoirs étant ensuite remplis en orbite avant de s'envoler vers leur lointaine destination *(voir ci-contre)*. Présenté par ses concepteurs comme *« la fusée la plus puissante jamais réalisée »*, Starship pourra emporter jusqu'à 100 tonnes en orbite terrestre. Des billets ont déjà été vendus à l'entrepreneur japonais Yusaku Maezawa, qui invitera six à huit artistes pour un voyage de six jours autour de la Lune, au milieu des années 2020. ■

Sylvie Rouat @srouat1

Salle de sport et infirmerie

Tunnel d'accès aux différents niveaux.

Espace de travail et cuisine

Pont supérieur
Cet espace servira de cockpit au moment du lancement et pourrait ensuite se convertir en salle de réunion, d'observation et salle-à-manger.

Coque extérieure
En acier, son point de fusion est plus élevé que les matériaux comme le carbone ou l'aluminium et peut supporter des températures jusqu'à 870 °C.

Cabines pour l'équipage.

Laboratoire de production de plantes.

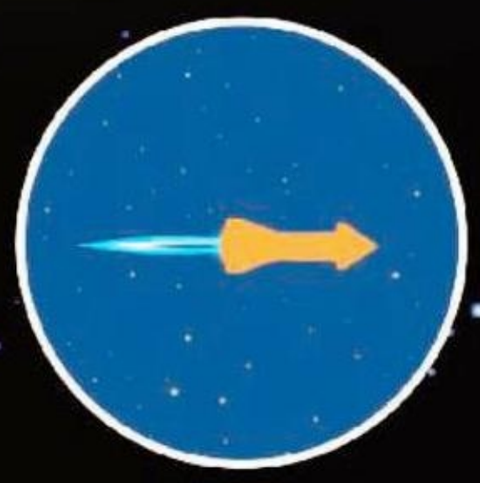
LANCEMENT

Un décollage en plusieurs étapes

STARSHIP échappera à l'attraction terrestre grâce au lanceur Super Heavy, d'une hauteur de 68 m.

APRÈS LA MISE EN ORBITE du vaisseau, le lanceur réutilisable reviendra se poser à la verticale sur le site de lancement.

LE RAVITAILLEMENT en carburant de Starship se fera par un vaisseau placé préalablement en orbite.



LE VAISSEAU allumera alors ses moteurs pour se placer sur une trajectoire vers la Lune ou Mars.

Où sont les planètes ?

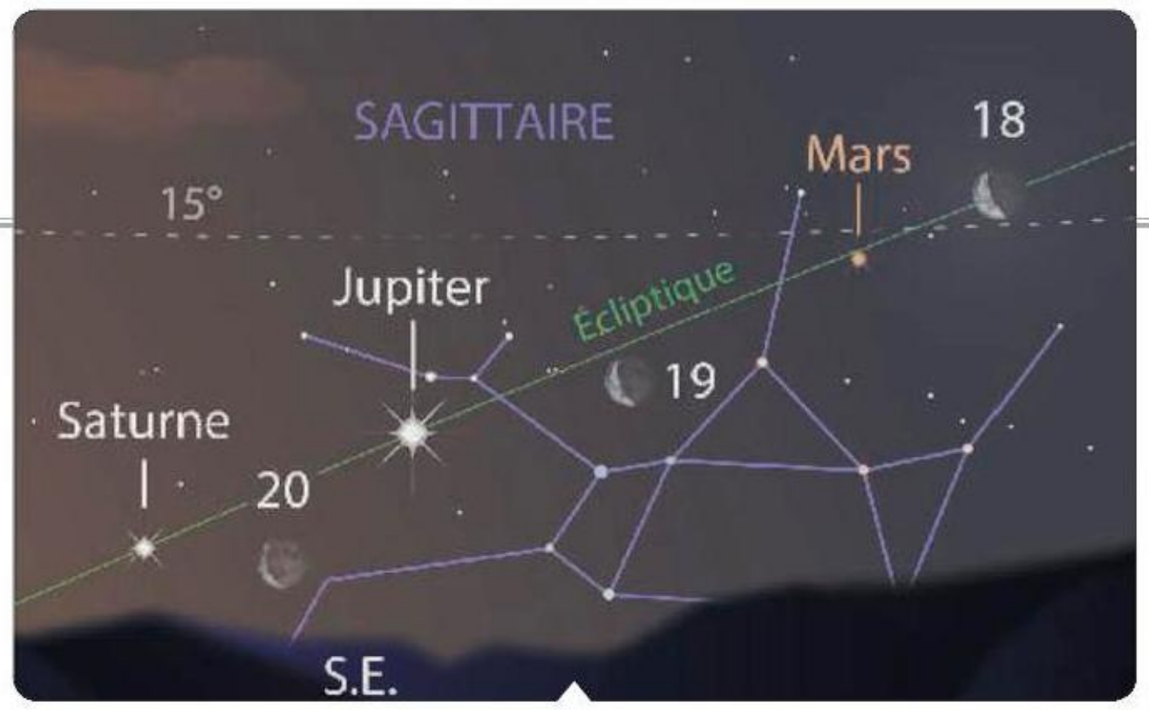
MERCURE La petite planète atteint sa plus grande distance angulaire (18°) à l'est du Soleil le 10. Elle est alors visible en soirée *(voir l'encart ci-dessous)*. Mercure passe en conjonction inférieure avec l'astre du jour le 26.

VÉNUS L'étoile du Berger se trouve dans d'excellentes conditions d'observation et resplendit en soirée bien au-dessus de l'horizon ouest. Par son éclat, elle attire immanquablement l'œil. Vénus se couche près de 4 h après le Soleil.

MARS La planète Rouge est visible en fin de nuit vers le sud-est. Elle quitte Ophiucus le 11 pour finir le mois dans la constellation du Sagittaire. Son éclat couleur caramel n'est encore que le pâle reflet de celui qu'elle arborera en octobre prochain lors de son opposition.

JUPITER Observable en fin de nuit et au petit matin, la plus massive des planètes s'éloigne progressivement des lueurs de l'aube. On la trouve vers le sud-est, à une dizaine de degrés de hauteur, lorsque s'annonce le jour. Jupiter est, en ce moment, l'astre ponctuel le plus brillant du ciel après Vénus.

SATURNE Après être passée en conjonction avec le Soleil le 13 janvier, la planète aux anneaux redevient timidement visible en seconde quinzaine de mois, très bas vers le levant en toute fin de nuit. Ainsi, le 29, elle se lève 1h45 avant notre étoile.



Aspect du ciel du 18 au 20, 45 minutes avant le lever du Soleil. Sous nos latitudes, l'écliptique n'est que peu incliné sur l'horizon le matin.

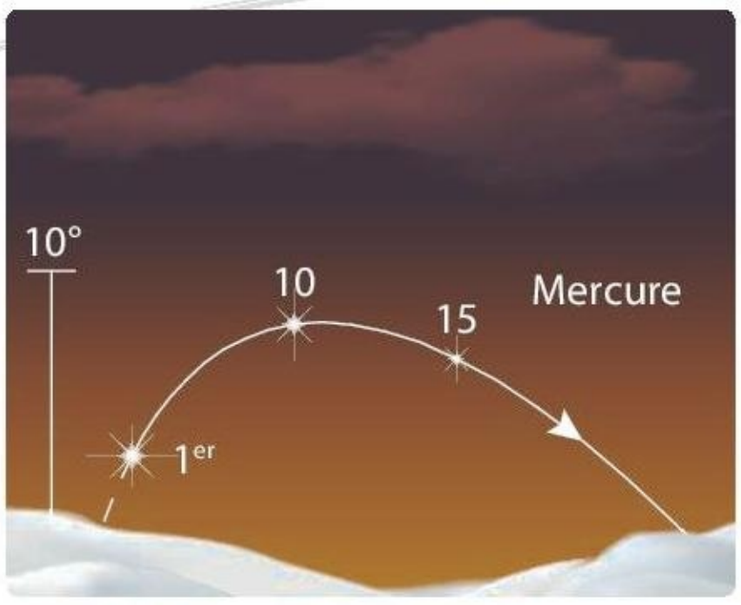
Trois planètes, hôtes du Sagittaire

EN CETTE SECONDE QUINZAINE DE FÉVRIER, la constellation du Sagittaire — à la forme de théière — accueille trois planètes visibles conjointement au petit matin : Mars, Jupiter et Saturne. Quasi alignées sur l'écliptique (la projection sur la voûte céleste du plan dans lequel les planètes circulent autour du Soleil), elles recevront la visite d'une Lune à la phase décroissante du 18 au 20. Jupiter est la plus brillante des trois planètes, suivie par Saturne puis par Mars.

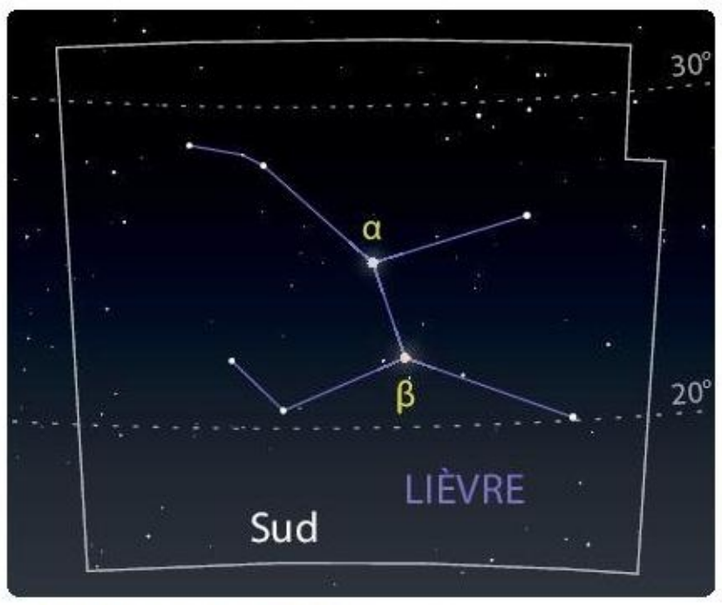
Notre conseil La faible inclinaison de l'écliptique le matin est préjudiciable au confort et à la qualité des observations. Il convient donc de trouver un horizon sud-est bien dégagé pour profiter au mieux du spectacle.

L'appli du mois

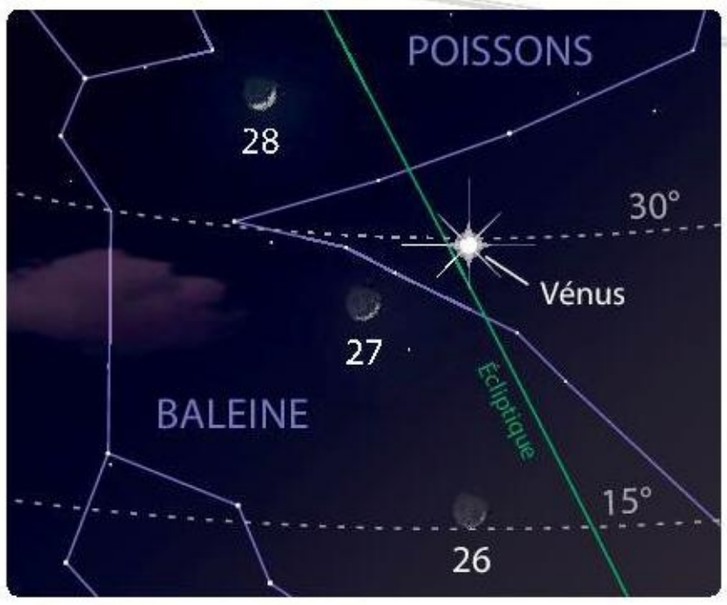
LUNAFAQT est une application gratuite en français pour les appareils fonctionnant sous Android. Elle montre l'aspect de la Lune pour n'importe quel lieu et à n'importe quelle date, donne les heures de lever et de coucher du Soleil et de la Lune, les heures de début et de fin des différents crépuscules et les dates des prochaines phases de Lune.



MERCURE EST OBSERVABLE EN SOIRÉE vers l'ouest-sud-ouest pendant deux semaines environ. Il est ici 45 minutes après le coucher du Soleil. Notez son éclat décroissant au fil des jours.

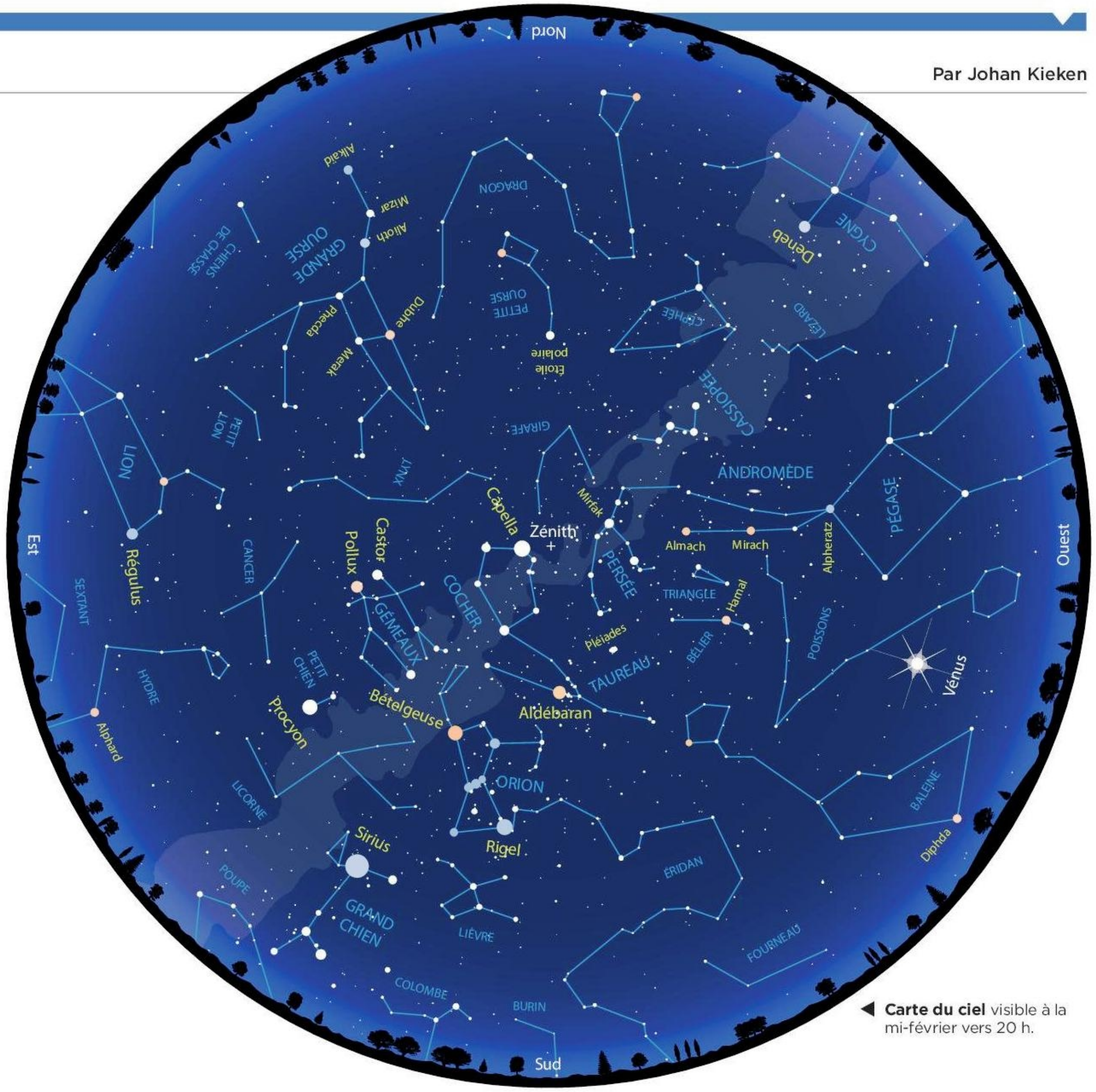


SITUÉE SOUS ORION ET À QUELQUES DEGRÉS À L'OUEST DE SIRIUS, l'étoile la plus brillante du ciel nocturne, le Lièvre est une constellation hivernale observable plein sud vers 21 h.



LE 27, 1 H APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, un fin croissant de Lune enveloppé d'une belle lumière cendrée sera à 6° de l'étincelante planète Vénus dans la constellation des Poissons.

Par Johan Kieken



◀ **Carte du ciel** visible à la mi-février vers 20 h.

La Lune

Premier quartier : dimanche 2 à 3 h (La Lune se trouve alors dans la constellation du Bélier)

Pleine Lune : dimanche 9 à 9 h (Lion)

Dernier quartier : samedi 15 à 23 h (Balance)

Nouvelle Lune : dimanche 23 à 17 h (Verseau)

Le Soleil

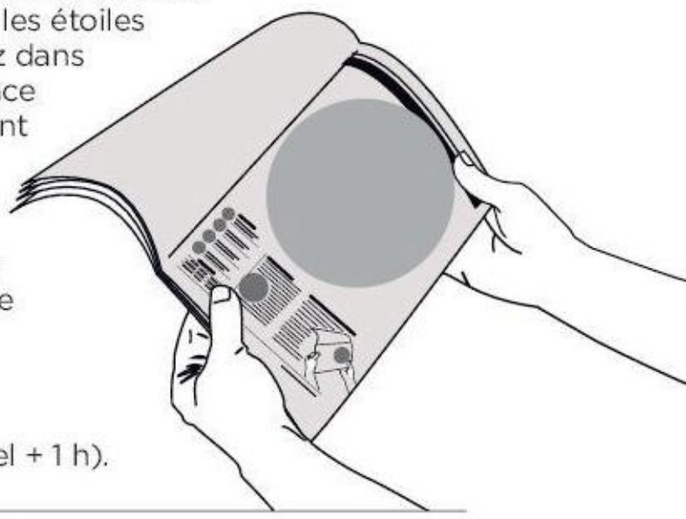
(à Paris)	Lever	Coucher
1er février	8h22	17h47
29 février	7h34	18h33

D'où voir le ciel

Notre carte tracée pour une latitude de 47° nord montre le ciel visible en France métropolitaine, et plus largement en Europe et dans le monde, à l'intérieur d'une bande s'étendant de 40 à 54° de latitude nord. Si vous êtes au nord du 47e parallèle, l'étoile Polaire sera plus haute dans votre ciel et plus basse dans le cas contraire.

Comment utiliser cette carte

Faites tourner votre magazine sur lui-même, de façon à ce que le nom de la direction dans laquelle vous observez soit écrit à l'endroit. Les constellations et les étoiles que vous retrouverez dans le ciel qui vous fait face sont toutes celles dont le nom est lisible sans trop pencher la tête. La position des planètes visibles à l'œil nu est indiquée pour le 15 du mois.



Les heures sont données en heure légale française (temps universel + 1 h).

JASON LEE/REUTERS

Surveillance, cyberattaque, détournement de données..., l'ouvrage détaille les moyens utilisés par des entreprises chinoises (ici Huawei) pour s'approprier des technologies françaises.

Quand les Chinois sont partout

Une enquête passionnante ciblant les secteurs d'activité français espionnés par la Chine. Avec une angoissante interrogation : quelle stratégie pour résister ?

ESPIONNAGE Aéronautique, robotique, biotechnologies, télécoms 5 G… Veut-on connaître les dix secteurs où la Chine est susceptible de (cyber) espionner la France, ses laboratoires, ses entreprises ? Il faut prendre connaissance du plan « Made in China 2025 », rappelle Antoine Izambard, journaliste spécialiste d'actualité internationale au magazine *Challenges* (groupe Challenges dont *Sciences et Avenir* fait partie), dans son passionnant ouvrage *France-Chine. Les liaisons dangereuses*. À tout seigneur (médiatique), tout honneur, le livre débute avec « Huawei, un géant sous étroite surveillance ». On sait l'offensive américaine contre le champion chinois des équipements pour télécoms et des smartphones. Ce que l'on sait moins et qui est révélé ici, c'est comment Huawei *« a gagné dix ans de R&D »* dans les années 2000 en s'appropriant un code majeur créé par Alcatel, jadis *« entreprise fringante des années 1990 qui a introduit avec succès le haut débit Internet par [le mode de codage] DSL »*. Depuis 2003, l'entreprise de Shenzen a ouvert *« cinq centres de R&D »* en France. La question se pose ici de la propriété des brevets, dont Huawei *« est le champion mondial toutes entreprises confondues (5400 déposés en 2018) »*. L'ouvrage fourmille de bien d'autres exemples, dont la très *« intense et douloureuse coopération »* autour du P4 (laboratoire haute sécurité destiné à la manipulation des agents pathogènes les plus dangereux comme les virus Ebola, coronavirus, H5N1…), rebaptisé ici *« l'usine à gaz franco-chinoise »* ! Ou la révélation d'une violente cyberattaque en 2013 contre la Direction des applications militaires (DAM) du CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), avec ciblage du Léti (laboratoire d'électronique et de technologie de l'information). Question récurrente de l'auteur après 140 entretiens menés pour écrire ce livre, quelle stratégie pour résister ? Le constat est sombre. ■

Dominique Leglu

France-Chine. Les liaisons dangereuses, Antoine Izambard, Stock, 258 p., 19 €

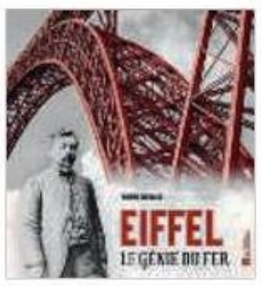
Une IA vous parle

ANTICIPATION Vous l'ignoriez mais l'intelligence artificielle forte, capable de tout et consciente d'elle-même, ce rêve que même les chercheurs du domaine affirment impossible existe. En tout cas dans ce roman dont la narratrice est une IA forte, née au cœur des réseaux, nourrie de toutes les données qu'elle y trouve. Problème : personne n'y croit. La voilà donc décidée à se dévoiler au monde. Elle trouvera sur son chemin un certain Yann Le Cun. Le récit se lit d'une traite et parvient, sous des dehors fantasques, à distiller toute l'histoire de l'IA. Jusqu'à un dénouement très malin. ■ **A. D.**

Le_Zéro_et_le_un.txt, Josselin Bordat, Flammarion, 304 p., 19 €

L'homme du fer

GÉNIE CIVIL Spécialiste du XIXe siècle, l'auteur raconte l'ascension de Gustave Eiffel sur fond de période coloniale et d'industrialisation galopante. Il explique comment Eiffel, ingénieur chimiste, pourtant *« très moyen en dessin technique et en métallurgie »*, fut auréolé de gloire et devint riche à millions. Organisateur hors pair et homme de réseaux entouré de fameux collaborateurs, il construisit des gares, des églises, des ponts et viaducs partout dans le monde ! Une part importante de l'ouvrage est consacrée bien sûr à la célébrissime tour qui porte son nom : du dégoût et craintes qu'elle suscita pendant sa construction, jusqu'aux expériences scientifiques, notamment météorologiques, conduites dès son inauguration. ■ **F. D.**



Eiffel, le génie du fer, Philippe Ménager, Christine Bonneton Éditeur, 191 p., 24,90 €

Les fondements de l'histoire

EXCAVATIONS La vérité est dans le sol ! *« Les textes historiques les plus anciens n'ont qu'à peine 5000 ans, et ils ne concernent qu'une petite fraction du monde : la Mésopotamie, l'Égypte… Si l'on veut réfléchir à l'histoire de l'Humanité dans la profondeur du temps, seule l'archéologie le permet ! »*, explique Jean-Paul Demoule. Pour l'auteur de cet essai engagé, cette discipline scientifique permet aujourd'hui, grâce à l'explosion et à la diversité des découvertes, de se placer au cœur de thèmes aussi actuels que les questions d'identité, de roman national ou de religions (*lire aussi* S. et A. *n° 875*). ■ **B. A.**

Aux origines, l'archéologie, Jean-Paul Demoule, La Découverte, 334 p., 19 €

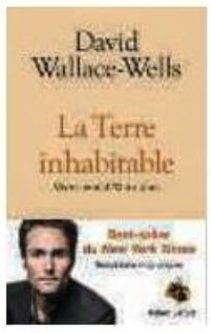
Les joies de la bioacoustique

CHANT DES OISEAUX Les ornithologues le savent : sur le terrain, on entend les oiseaux plus facilement qu'on ne les voit. Voici le premier ouvrage pratique de bioacoustique pour maîtriser l'enregistrement de leurs cris et de leurs chants, choisir le matériel et découvrir les techniques adéquates. Il a été concocté par Stanislas Wroza, en charge de l'Observatoire national de la biodiversité et fondateur du projet soundbirding.org. Les méthodes d'analyse des « sonagrammes » y sont détaillées et ce sont 205 espèces d'oiseaux qui sont ici décrites par leurs chants et cris. En bonus, des QR Codes permettent de télécharger leurs sons. ■ **R. M.**

Les Oiseaux par le son, Stanislas Wroza, Delachaux et Niestlé, 144 p., 16,90 €

Ça chauffe !

APOCALYPSE Le constat est effrayant : un scénario établissant la hausse des températures globales à 4 °C rendrait l'avenir de la Terre apocalyptique. Le journaliste américain David Wallace-Wells a mis en perspective les résultats de multiples rapports scientifiques. Des réactions en chaîne consécutives aux phénomènes naturels extrêmes, à l'appauvrissement des sols, à la raréfaction des ressources en eau et en énergie se traduiraient en famines, épidémies, conflits… Sa conclusion laisse cependant la place à une marge d'action. ■ **A. De B.**



La Terre inhabitable, David Wallace-Wells, Robert Laffont, 389 p., 21 €

La richesse de l'empathie

CERVEAU Que faire si un inconnu s'embourbe dans des sables mouvants ? On peut plonger pour l'aider, victime d'une contagion émotionnelle qui empêche toute réflexion. Ou bien, ressentir de la « sympathie » pour lui, adopter son émotion et ne plus penser objectivement. Ou enfin prendre en compte son émotion tout en restant soi-même afin d'apporter la meilleure solution possible : c'est faire preuve d'*« empathie »* ! S'appuyant sur la littérature scientifique, Carole Chatelain, rédactrice en chef de *Sciences et Avenir*, démontre ici la nécessité d'exercer cette haute fonction cognitive qu'est l'empathie, pour gérer toute situation conflictuelle. Concis, pédagogique et utile ! ■ **E. S.**

Médiation : comment développer son empathie ? Carole Chatelain, Archetype82 (www.archetype82.fr), 107 p., 15 €

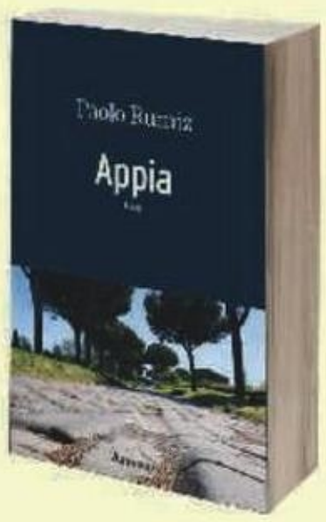
Exode planétaire

MIGRATION Dans quatre à cinq milliards d'années — estiment les astrophysiciens — le Soleil sera devenue une « géante rouge ». Le Chinois Liu Cixin, mondialement connu après sa trilogie du *Problème à trois corps*, nous plonge dans ce *« futur proche »* où le *« gouvernement de la coalition »* dont s'est dotée l'humanité est persuadé qu'il n'y a pas de planète de rechange pour notre espèce. *« Si l'humanité part dans l'espace en abandonnant sa Terre, elle sera comme un nouveau-né privé de sa mère au milieu du désert »*, souligne l'un des personnages. Des savants calculs d'orbite, émerge un projet fou : un exode de 2500 ans au terme duquel, la planète, équipée de gigantesques propulseurs, devra se placer en orbite autour de l'étoile la plus proche. Survivre à l'exode obsède alors les humains qui doivent composer avec une Terre loin de son soleil, devenue provisoirement inhospitalière. Tout le talent de Liu Cixin est dans cette nouvelle écrite en 2000 : réflexion sur le sens de la vie, très grande cohérence scientifique et grande difficulté de faire un choix impliquant le salut de l'humanité. ■

Azar Khalatbari

Terre errante, Liu Cixin, Actes Sud, 80 p., 9 €

À la recherche de la première route européenne



MOBILITÉS ANTIQUES Que reste-t-il de la voie Appienne une fois passés les environs de Rome ? Pas grand-chose apparemment. Entre avril 2015 et fin janvier 2016, le journaliste italien Paolo Rumiz a parcouru à pied la toute première route européenne de l'histoire, construite à l'initiative de Appius Claudius entre Rome et Brindisi à partir de 312 avant Jésus-Christ. Pas une mince affaire tant ce tracé dallé de 500 à 600 kilomètres se perd vite dans la campagne et les régions arides, mal ou pas entretenu, abandonné, effacé, livré aux riverains qui accaparent portions de route, dalles de basalte et autres sculptures antiques. Sans parler de l'incurie des autorités locales. Cette marche à travers la moitié sud de l'Italie se double d'emblée d'une réflexion sur la préservation, les difficultés des archéologues, des conservateurs et des historiens à faire entendre leurs voix face aux élus, aux habitants, voire à la mafia. Comme tout bon récit de voyage, Appia n'explore pas le passé mais le présent. ■

Arnaud Devillard

Appia, Pablo Rumiz, Arthaud, 514 p., 22,50 €

C'EST À VOIR

EXPOSITIONS

Colmar (68)

Musée Unterlinden
Inauguration d'un nouveau parcours consacré à l'archéologie, allant du néolithique à l'âge du fer, avec des objets rares comme les grandes jarres néolithiques à décor rubané.
Musée Unterlinden, place Unterlinden. Rens. : 03.89.20.15.50.

Dunkerque (59)

Cosmos. Silence, on tourne !
Une sélection d'une centaine d'œuvres d'art contemporaines sur le thème de l'exploration de l'espace réunies à l'occasion du cinquantenaire de la mission Apollo 11. Le 2 février à 15 h, Daniel Kunth, astronome à l'Institut d'astrophysique de Paris, et Bernard Moninot, plasticien, donneront une conférence sur le thème « Représenter l'invisible ».
LAAC, jardin des Sculptures, 302, avenue des Bordées, jusqu'au 15 mars. Rens. : 03.28.29.56.00.

Lyon (69)

Traces du vivant
Utilisés depuis la préhistoire pour le façonnage d'outils et d'objets divers, les os permettent aussi aujourd'hui de raconter l'histoire des êtres vivants.
Musée des Confluences, 86, quai Perrache, du 7 février au 6 décembre. Rens. : 04.28.38.12.12.

Marly-le-Roi (78)

Musée du Domaine royal de Marly
Réouverture après trois ans de travaux de ce musée consacré à la résidence intime de Louis XIV. Le nouveau parcours présente notamment une maquette au 1/5 d'une roue de la machine de Marly, expliquant le fonctionnement de cette installation destinée à alimenter les fontaines de Versailles.
1, Grille Royale – parc de Marly. Rens : 01.39.69.06.26.

Marseille (13)

Voyage voyages
Comment les artistes ont symbolisé l'idée du déplacement ou de l'exil à travers une centaine d'œuvres, peintures, sculptures, installations, dessins, photographies et vidéos.
Mucem J4, jusqu'au 4 mai. Rens. : 04.84.35.13.13

Montbéliard (25)

Mission corps humain
Les différents organes du corps humain racontés aux enfants à partir de 8 ans.
Le Pavillon des sciences, Parc scientifique du Près-la-Rose, du 3 février au 7 mars 2021. Rens. : 03.81.91.46.83.

Paris (75)

Mille & Une orchidée
Pour la 8e édition du rendez-vous des orchidophiles, le Jardin des plantes propose un parcours inédit d'orchidées « stars d'Instagram » qui mettra en valeur des fleurs très graphiques de formes variées et étonnantes.
Grandes serres du Jardin des plantes, 57, rue Cuvier, du 5 février au 2 mars. Rens. : 01.40.79.56.01.

PARTENARIATS SCIENCES AVENIR

Paris (75)

Univers convergents
Nouvelle édition du ciné-club scientifique de l'Institut Henri-Poincaré « Sciences, fictions, société ». La première séance sera consacrée au film d'Arnaud et Jean-Marie Larrieu *Les Derniers Jours du monde*, en présence de la sociologue Cécilia Calheiros et du mathématicien Rodolphe Turpault.
Cinéma Grand Action, 5, rue des Écoles, le 28 janvier à 19 h 30. Inscriptions : www.ihp.fr/cine-club

Paris (75) et Lyon (69)

Le cœur des femmes et des hommes, quelles différences ?
Conférence du cycle « santé en questions », avec la participation de Nabila Bouatia-Naji, directrice de recherche Inserm, Philippe Ménasché, cardiologue à l'Hôpital européen Georges-Pompidou et de l'épidémiologiste Marie-Christine Boutron-Ruault.
Cité des sciences et de l'industrie, 30, avenue Corentin-Cariou, en duplex avec le musée des Confluences de Lyon, le 6 février à 19 h. Rens. : conferences@universcience.fr

MUSÉE DE LA ROMANITÉ

Modèle 3D de l'arche de Septime Sévère de Lepcis Magna (Libye).

Nîmes / Musée

Bâtir un Empire

Alors qu'il s'apprête à franchir le cap des 400 000 visiteurs depuis son ouverture, il y a 18 mois, le musée de la Romanité, à Nîmes, accueille une exposition dont le décor se résume à des écrans (dont le plus grand est long de 24 m !) et des panneaux. La promesse : une immersion dans sept sites archéologiques classés par l'Unesco, menacés ou difficilement accessibles. Des sites aussi éloignés que Baelo Claudia, en Espagne, ou Garni, en Arménie, en passant par Carthage, en Tunisie, ou Pompéi, en Italie. Leur point commun : tous étaient situés dans l'Empire romain. Les vestiges permettent aujourd'hui de se rendre compte de la formidable influence de la culture romaine sur l'organisation des cités comme sur l'architecture. Les images ne sont pas des reconstructions virtuelles mais un véritable état des lieux réalisé par la société Iconem à l'aide d'appareils photo et de drones réalisant des relevés photogrammétriques. Cette start-up a été fondée en 2013 pour numériser le patrimoine en danger (*lire* S. et A. *n° 797 et 837*). Ici, elle a œuvré avec le musée de la Romanité pour proposer une exploration inédite des sept sites. Avec des vues choisies en collaboration avec Vivien Barrière, maître de conférences en histoire et archéologie à CY Cergy Paris Université. Les projections se terminent par une expérience de réalité virtuelle conçue par l'éditeur français de jeux vidéo Ubisoft : une plongée dans les sites de Palmyre en Syrie et Lepcis Magna en Libye. La vue des arènes de Nîmes au sortir du musée s'apprécie ensuite différemment, en pleine conscience de ne pas être seulement dans une ville romaine, mais au cœur d'un immense empire. ■

Mathieu Nowak

Musée de la Romanité, 16, boulevard des Arènes, jusqu'au 8 mars. Rens. : 04.48.21.02.10.

Retrouvez toutes les expositions dans notre guide Internet : **sciav.fr/guideexpos**

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

PHYSIOLOGIE

Pourquoi ne peut-on pas se chatouiller soi-même?

Phuong M.

S'il est impossible de ressentir les chatouilles que l'on se fait à soi-même, c'est qu'il existe dans le cerveau un mécanisme qui réprime ces sensations venant de soi. Des chercheurs de l'University College de Londres (Royaume-Uni) l'ont découvert en 2000 en soumettant une quinzaine de volontaires à des expériences sous IRM dans lesquelles une éponge actionnée par un mécanisme robotique tentait de les chatouiller. Ils ont observé que lorsque les personnes actionnaient elles-mêmes le mécanisme, la réaction du cerveau était contrecarrée par le cervelet : celui-ci « avertit » en quelque sorte le reste du cerveau de ne pas tenir compte des sensations. Toutefois, le cervelet est trompé si la chatouille ne se déclenche pas immédiatement après avoir actionné le mécanisme. ■

Lise Loumé @LysLoume

BIOLOGIE

Quelle est la plus petite forme de vie connue sur Terre?

Ghislain H.

La plus petite forme de vie identifiée sur Terre est constituée d'une seule cellule : une bactérie, découverte en 2015 dans les eaux souterraines du Colorado par des chercheurs de l'université de Californie, Berkeley (États-Unis). Elle a une contenance de 0,009 micromètre cube (un micromètre représentant un millionième de mètre) et 150 000 d'entre elles pourraient ainsi tenir sur la pointe d'un cheveu. Son génome compte environ un millier de paires de bases, contre plusieurs milliers voire plusieurs millions pour la plupart des bactéries les plus courantes. Reste qu'il n'existe pas de consensus au sein des scientifiques sur la taille minimale nécessaire à un organisme pour vivre. ■ **L. L.**

ERIC KULIN/DESIGNPICS/PLAINPICTURE

Chauffées à 60-70 °C, les protéines de l'œuf se déplient et s'agglutinent.

PHYSIQUE-CHIMIE

Est-il possible de « décuire » un œuf dur?

Virgile A.

Si l'on place un œuf dans une casserole d'eau bouillante à 100 °C, on obtient bien sûr en quelques minutes un œuf dur. Mais peut-on lui rendre ensuite sa forme liquide initiale en le mettant dans de la glace par exemple? Non, car du point de vue de la chimie, la cuisson de l'œuf consiste en un réarrangement des protéines qui le composent, celles du blanc se recomposant avant celles du jaune. Ce phénomène se déroule entre 60 et 70 °C. Schématiquement, les protéines se déplient et s'agglutinent pour donner à l'œuf cuit sa consistance solide mais molle. Pourtant, Gregory Weiss, professeur de chimie et de biologie moléculaire aux universités de Californie (États-Unis) et de Flinders (Australie), a proposé en 2015 une méthode pour « décuire » un œuf, autrement dit *« séparer les protéines agglutinées et leur permettre de reprendre leur conformation initiale »*! Le procédé est peu ragoûtant : il consiste à dissoudre le blanc dans de l'urée — le principal déchet organique éliminé dans l'urine —, celle-ci ayant la propriété de démêler certaines protéines (lysozymes). Résultat : l'œuf redevient liquide mais les protéines n'ont pas encore pour autant retrouvé leur forme initiale. Il est alors placé dans une centrifugeuse, l'objectif étant de le soumettre à des contraintes de cisaillement : les protéines sont ainsi étirées et, une fois relâchées, reprennent leur conformation d'origine. Reste que l'œuf « décuit » dans l'urée... n'est pas consommable. Pour le chercheur, cette expérience avait surtout pour but de mettre au point une technique de nettoyage de tubes de verre salis par des amas de protéines collantes. ■

Mathieu Nowak
@mathieu_nowak

Le Zolgensma, commercialisé depuis 2018, traite l'amyotrophie spinale, une affection génétique qui entraîne une atrophie irréversible des muscles.

Que traite le médicament « le plus cher du monde » ?

CONTEXTE En octobre 2019, une famille belge lançait une collecte de fonds pour réunir 1,9 million d'euros nécessaires à l'achat du Zolgensma afin de soigner leur enfant, imitée depuis par d'autres familles en France.

Le Zolgensma est un médicament commercialisé par le laboratoire suisse Novartis depuis mai 2018. Il est indiqué pour traiter l'amyotrophie spinale, une maladie génétique rare qui entraîne une atrophie irréversible des muscles. Il existe une vingtaine de nouveaux cas chaque année en France. Elle est due à une déficience du gène SMN1 qui permet la production de la protéine de survie des cellules nerveuses qui contrôlent l'activité des muscles, les motoneurones. « *L'anomalie entraîne leur dégénérescence : les muscles s'atrophient, menaçant les fonctions alimentaires et respiratoires* », explique la professeure Isabelle Desguerre, cheffe du service de neuropédiatrie de l'hôpital Necker, à Paris. Le décès de l'enfant survient en général durant les deux premières années de vie.

La thérapie génique Zolgensma compense le déficit de SMN1. Avant sa commercialisation, il n'existait qu'un traitement, Spinraza, du laboratoire américain Biogen : six injections la première année et puis quatre par an à vie, le tout pour un coût de 420 000 euros la première année puis 280 000 euros par an. Zolgensma, lui, ne s'administre qu'en une seule injection, une fois pour toutes. C'est ainsi que le laboratoire justifie en partie le prix du traitement : une seule injection pour le prix de cinq ou six ans de traitement par Spinraza.

JESSICA RINALDI / THE BOSTON GLOBE VIA GETTY IMAGES

Ironie de l'histoire, la découverte du gène défectueux et la mise au point de la thérapie génique ont été faites en France dans les années 1990-2000, en grande partie grâce au financement du Téléthon. Mais c'est une start-up américaine, AveXis, qui a conduit les développements cliniques avant qu'elle ne soit rachetée par le laboratoire suisse Novartis en 2018 pour… 8,7 milliards de dollars ! C'est lui qui a obtenu, en mai 2018, l'autorisation de mise sur le marché américain et qui a fixé le prix.

Une « autorisation » sous conditions en France

Si des parents français ont lancé des collectes de fonds pour financer le médicament, ils ne seront pas pour autant autorisés à faire traiter directement leur enfant. L'autorisation pour le marché européen est en effet en cours. Et si Zolgensma peut être d'ores et déjà être administré dans l'Hexagone et pris en charge grâce à une « autorisation temporaire d'utilisation nominative » (ATUn), c'est seulement sous certaines conditions. *« Il faut que le diagnostic ait bien été confirmé par un test génétique*, détaille Isabelle Desguerre. *L'enfant doit en outre être âgé de moins de 2 ans. En effet, l'injection doit être effectuée le plus tôt possible car chaque jour des motoneurones sont détruits de manière irréversible.* » Et ce n'est pas tout : le jeune patient ne doit pas déjà être traité par Spinraza, ni être sous assistance respiratoire ou nutritionnelle. En décembre 2019, sur dix dossiers expertisés, seuls cinq avaient rempli toutes les conditions pour pouvoir recevoir le traitement.

Olivier Hertel
@OlivierHertel

LE SIGLE DU MOIS

Inrae

Le 1er janvier, l'Inra (Institut national de la recherche agronomique) a fusionné avec l'Irstea (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture) pour former l'Inrae (Institut national de recherche en agronomie et environnement). Un véritable mariage malgré des tailles très différentes — 10 000 salariés pour le premier contre 2000 à peine pour le second — car les deux organismes sont complémentaires. Les thématiques environnementales, agronomiques et alimentaires de l'Inra s'associeront aux recherches sur le matériel agricole, sur les risques d'inondations et d'avalanches et sur l'agriculture numérique de l'Irstea. *« L'Inrae est désormais le plus gros organisme au monde spécialisé dans les relations entre l'agriculture, l'environnement et l'alimentation »*, se réjouit son P-DG. Philippe Mauguin. Le nouvel organisme va élaborer au cours de cette année son programme stratégique pour la prochaine décennie. ■

Loïc Chauveau
@Loïc_Chauveau

Pourquoi le volcan de White Island a-t-il tué ?

CONTEXTE Le 9 décembre, l'île volcanique de White Island (Nouvelle-Zélande) entrait en éruption, faisant 19 morts et 28 personnes gravement brûlées.

AFP

Le cratère, très accessible, est fréquenté par les touristes.

SITUÉ DANS LA BAIE de l'Abondance, au nord de la Nouvelle-Zélande, le volcan de White Island est le plus actif du pays. C'est aussi l'un des plus accessibles au monde, sa caldeira se trouvant au niveau de la mer. Aussi est-il régulièrement abordé par des bateaux de tourisme, des hélicoptères et des navires de croisière, tel l'*Ovation of the Seas*, présent sur les lieux ce 9 décembre.

L'éruption, selon les volcanologues néo-zélandais, était de type « phréatique ». Lorsque les masses d'eau à haute pression qui imprègnent les roches poreuses du volcan ou qui s'infiltrent dans l'édifice par des fissures entrent en contact avec du magma, elles se vaporisent de manière brutale. Cette vapeur mélangée aux gaz volcaniques provoque l'explosion du volcan. Dans le cas de White Island, *« cela a alimenté un panache de 3,6 kilomètres d'altitude, composé de vapeur d'eau surchauffée et de cendres de pulvérisation. Cela explique les graves brûlures relevées sur les victimes ainsi aspergées d'eau bouillante*, explique le volcanologue Jacques-Marie Bardintzeff. *Quant aux cendres, elles provoquent l'asphyxie par inhalation. Enfin, la projection de blocs de roche, de la taille d'un ballon de football, fait subir un véritable bombardement…* »

Ce type d'explosion brutale reste difficile à prévoir, même si le volcan néo-zélandais montrait des signes d'activité accrue depuis octobre 2019. Les tremblements volcaniques et les taux de dioxyde de soufre étaient à leur plus haut niveau depuis 2016, conduisant l'agence gouvernementale GeoNet à élever le 18 novembre le niveau d'alerte à 2 — sur une échelle allant jusqu'à 5 —, qui indique une réelle possibilité d'éruption. De fait, l'activité sismique peut être un facteur déclenchant d'éruption.

« Le désastre devait se produire un jour ou l'autre », se désole Ray Cas, professeur émérite à l'université Monash, en Australie. Le danger a en effet été sous-estimé. Tant par la famille Buttle, propriétaire de l'île depuis 1936, que par *« les acteurs de tourisme, qui continuaient à opérer sur le volcan en période d'activité accrue »*, souligne Bradley Scott, volcanologue au GNS Science, l'organisme d'information géologique de la Nouvelle-Zélande. D'où le bilan tragique. ■

Sylvie Rouat @srouat1
avec Olivier Lascar @Olivier_Lascar

Spécial * Aidés *

www.sciencesetavenir.fr

Sciences et Avenir au quotidien

AFP

TECHNO

Visite d'un sous-marin nucléaire

Valentine Delattre, journaliste vidéo
@sciencecomptoir vdelattre@sciencesetavenir.fr

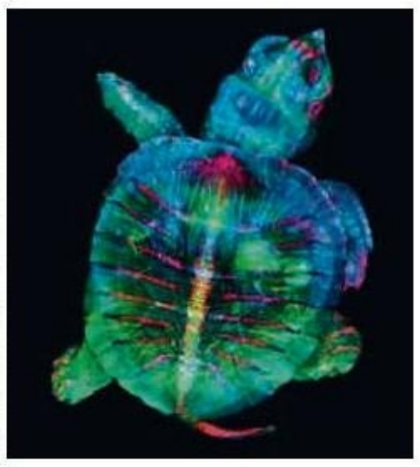
AFP

Coulant une retraite paisible à Cherbourg, le sous-marin nucléaire lanceur d'engins (SNLE) *Le Redoutable* compte à son actif 90 000 heures de plongée et plus d'un million de kilomètres parcourus. Visite guidée par Bernard Cauvin, directeur de la Cité de la mer. **sciav.fr/LeRedou876**

NATURE

Fascinantes images du micromonde

Anne-Sophie Tassart, journaliste
@TassartAS astassard@sciencesetavenir.fr


KUGLER & ZGODA/ NIKON SMALL WORLD COMPETITION

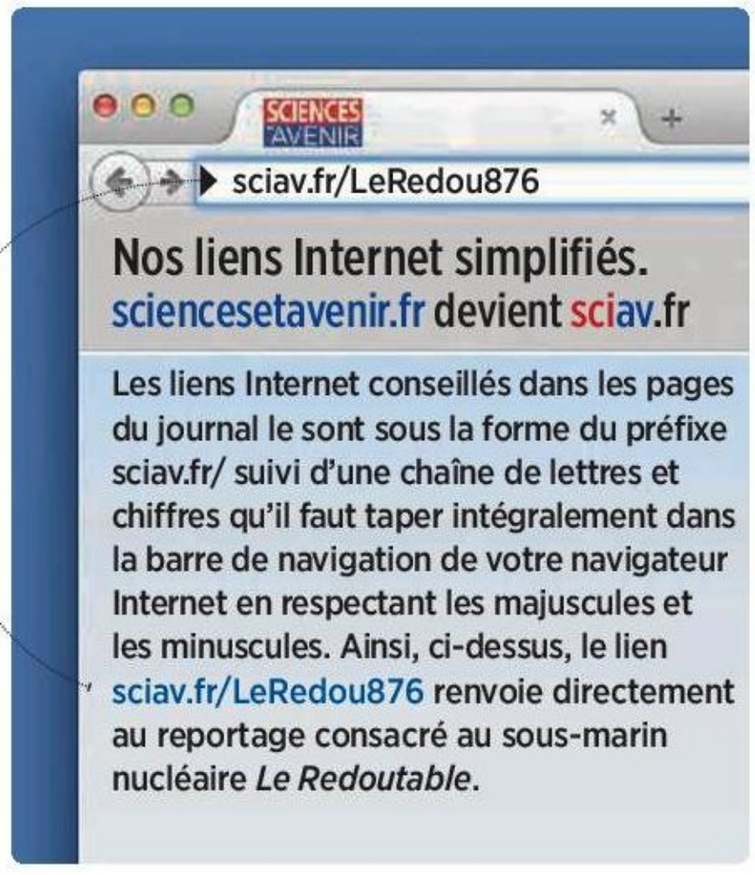
Corail émergent, organisme planctonique, tardigrades..., le concours de vidéos Nikon Small World in Motion a révélé ses grands gagnants et, cette année encore, les images sont impressionnantes. **sciav.fr/Micro876**

SANTÉ

Au retour de la plus haute ville du monde

Camille Gaubert, rédactrice santé
@CamilleGaubertb cgaubert@sciencesetavenir.

« Hallucinant », « jamais vu », « les valeurs les plus élevées au monde » : de retour de la ville la plus haute de la planète au Pérou, les spécialistes français de l'hypoxie à l'Inserm — le manque d'oxygène dans le sang — n'en reviennent toujours pas. Car à La Rinconada, les 50 000 habitants qui vivent à 5300 m au-dessus du niveau de la mer ont le sang tellement visqueux qu'il bouche les machines médicales. Leur taux d'oxygène sanguin est si bas que, dans des conditions habituelles, ils seraient hospitalisés. Mais malgré leurs adaptations génétiques exceptionnelles, les habitants pâtissent de ces conditions extrêmes et réclament des soins que la mission Expédition 5300 compte bien leur apporter dès février. Sera alors entamé un essai clinique particulièrement délicat, le plus haut au monde. Entretien vidéo avec Samuel Vergès, chercheur à l'Inserm et responsable de l'Expédition 5300. **sciav.fr/oxy876**



VOYAGE DU SAVOIR

AUTOUR DE LASCAUX

Un voyage en art pariétal

AFP

Le premier Voyage du savoir *« Autour de Lascaux »* a conduit les lecteurs de *Sciences et Avenir* à la découverte du Périgord noir et de son héritage préhistorique. **sciav.fr/Lascaux876**

Le Musée national de la préhistoire

AFP

Aux Eyzies-de-Tayac (Dordogne), une plongée dans les réserves de cet établissement de référence, décryptées par la technicienne de recherche Peggy Bonnet. **sciav.fr/Eyzies876**

Yves Coppens pour guide

SCIENCES ET AVENIR

Invité d'honneur du Voyage du savoir,le paléo-anthropologue et professeur honoraire au Collège de France Yves Coppens raconte l'art pariétal, de Chauvet à Lascaux. **sciav.fr/Coppens876**

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

Les voyages du SAVOIR SCIENCES ET AVENIR

DOLMENS ET MENHIRS DE CARNAC

En compagnie d'Yves Coppens (*)

27 au 30 septembre 2020

YVES COPPENS
Paléontologue, professeur au Collège de France

« J'ai 100.000 tonnes de granit sur les bras ». Yves Coppens s'amuse du nouveau rôle qu'il a accepté d'endosser, celui de « champion » de l'inscription des alignements de Carnac au patrimoine mondial de l'Unesco. Car le site du Morbihan, en Bretagne, n'y est toujours pas : sacrée injustice quand on pense à un autre lieu célèbre pour ses mégalithes, Stonehenge, en Angleterre, honoré du précieux label depuis... 1986 ! Il explique ce que les dolmens, menhirs, cairns et autres alignements de Carnac auraient à bénéficier de cette inscription au patrimoine mondial de l'Unesco, pourquoi ce site est «sacré» et le rôle historique joué par la Bretagne - chère à son cœur... - dans l'histoire du mégalithisme.

C'est à la découverte de ces « cailloux » extraordinaires sur les rivages du golfe du Morbihan qu'Yves Coppens invite les lecteurs de Sciences et Avenir !

Retrouvez l'entretien complet d'Yves Coppens avec Dominique Leglu sur le site web de Sciences et Avenir : bit.ly/2tFuekq

AVEC LA PARTICIPATION DE :

BERNADETTE ARNAUD
Grand Reporter à Sciences et Avenir

© Laurent Rannou

EMMANUELLE VIGIER
Archéologue, directrice du Musée de Préhistoire de Carnac

MARC SAUGIER
Organisateur des Voyages du Savoir

Carnac :
Le musée de Préhistoire

- 3 nuits / 4 jours en pension complète
- Prix par personne en chambre double : 975 €
- Début & fin du séjour à Auray (Morbihan)

(*) Sauf empêchement pour cas de force majeure

IM056130002

RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS : **BLB** TOURISME
ZONE DE KERBOIS 15, RUE YVES DE KERGUELEN 56400 AURAY
- COURRIEL : inscription@blb-tourisme.com - Tél. +33 (0) 297 566 086

Programme complet, renseignements et inscriptions sur le site web : voyages-du-savoir.fr

nouveau

Éveillez vos sens

AVEC LES CAPSULES L'OR ORIGINES

ALUMINIUM CAPSULES

ORIGINS COLLECTION

L'OR

ESPRESSO

INDIA

KARNATAKA

x10

L'OR SANS DOUTE LE MEILLEUR CAFÉ DU MONDE

JACOBS DOUWE EGBERTS FR SAS | 810 029 413 RCS Paris | 30 bis, rue de Paradis -75010 Paris -FRANCE | SAS au capital de 16 594 157,70 euros